Spett.le

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica

Direzione Generale Valutazioni Ambientali

Divisione V - Procedure di valutazione VIA e VAS

**OGGETTO** **Presentazione osservazione.**

**Progetto: Ampliamento del datacenter Noovle di Rozzano (MI) - installazione di gruppi elettrogeni di emergenza di potenza complessiva superiore a 150 MWt (270 MWt).**

**Procedura: Valutazione Impatto Ambientale**

**Codice Procedura: 13928**

Il/La Sottoscritto/a Vincenzo LEPORI presenta, ai sensi del D.Lgs.152/2006, la seguente osservazione per la procedura di Valutazione Impatto Ambientale relativa al Progetto in oggetto.

**Informazioni generali sui contenuti dell'osservazione**

- Aspetti di carattere generale
- Caratteristiche del progetto
- Aspetti programmatici e pianificatori
- Aspetti ambientali
- Altro: isola di calore

**Aspetti ambientali oggetto delle osservazioni**

- Altro: isola di calore calcolo cumulativo

**Osservazione**

*isola di calore calcolo cumulativo e osservazioni su monitoraggio anche sui siti limitrofi al sito di Rozzano*

Il Sottoscritto dichiara di essere consapevole che le presenti osservazioni e gli eventuali allegati tecnici saranno pubblicati sul Portale delle valutazioni e autorizzazioni ambientali VAS-VIA-AIA del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica.

**Elenco Allegati**

Allegato - Dati Personali OSS_9371_VIA_DATI_PERS_20261106.pdf

Allegato 1 - Osservazione_MASE_VIA_13928_Noovle_Rozzano.pdf OSS_9371_VIA_ALL1_20261106.pdf

Allegato 2 - Applicazione modello cumulativo Rozzano OSS_9371_VIA_ALL2_20261106.pdf

Allegato 3 - Teoria_del_modello_cumulativo_e_pericolosità OSS_9371_VIA_ALL3_20261106.pdf

Data 06/11/2026

Vincenzo LEPORI

# OSSERVAZIONI SCRITTE

ai sensi dell'art. 24 del D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 e s.m.i.

**Procedura VIA MASE n. 13928 —** «Ampliamento del datacenter Noovle di Rozzano (MI): installazione di gruppi elettrogeni di emergenza di potenza complessiva superiore a 150 MWt (270 MWt)» — Proponente: Noovle Società Benefit S.p.A. — avvio 12/05/2025, supplemento di istruttoria tecnica CTVIA, termine per la presentazione delle osservazioni 07/11/2026.

**Procedura collegata VIA MASE n. 14476 —** «Regione AWS Europe (Milan) – Espansione – Datacenter Edificio A nel comune di Zibido San Giacomo (MI)» — Proponente: Amazon Data Services Italy S.r.l. — avvio 06/01/2026, istruttoria tecnica CTVIA.

**Alla Commissione Tecnica di Verifica dell'Impatto Ambientale VAS e VIA**
Alla Segreteria Tecnica VIA/VAS — Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
e, per quanto di competenza, alla Commissione Tecnica di Valutazione Ambientale (CTVA) in istruttoria

**Il sottoscritto Vincenzo Lepori**, [omissis], in proprio e in qualità di curatore del volume «Teoria del modello cumulativo del calore per i data center» (prima edizione, novembre 2026), deposita, entro il termine fissato e per il tramite del portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali del MASE, le seguenti osservazioni alla Sintesi Non Tecnica e allo Studio di Impatto Ambientale del progetto, corredate dall'analisi tecnica in allegato.

## 1. Premessa e fondamento delle osservazioni

L'ampliamento del data center Noovle di Rozzano (Centro Telecomunicazioni MI-SUD, viale Toscana 3–5 / via Leonardo da Vinci 1; 45,3816 N — 9,1621 E) non comporta nuovo consumo di suolo e consiste nella conversione a sale dati di edifici esistenti e nell'installazione di 23 gruppi elettrogeni a gasolio da 3.000 kVA, che portano la potenza termica complessiva dei generatori di emergenza del sito a ~270 MWt. Il sito si colloca all'interno dell'agglomerato di Milano, in un'area a densità abitativa superiore a 3.000 abitanti/km², con standard di qualità dell'aria per PM10 già non rispettati allo stato attuale e meteorologia caratterizzata da frequenti inversioni termiche come lo stesso Studio di Impatto Ambientale riconosce.

Nel raggio di 8 km dal sito sono in procedura o in esercizio ulteriori cinque impianti data center; il più vicino è il data center Amazon di Zibido San Giacomo (procedura n. 14476, ~3,5 km), seguito da K2 Strategic a Zibido–Badile (~4,4 km, fino a 400 MW), APTO a Lacchiarella (~6 km), Stack Campus a Siziano (~7 km) e Noviglio (~8 km). L'area rappresenta pertanto il quadrante italiano con la più alta concentrazione programmata di data center, e la valutazione di incidenza cumulativa ex art. 5, comma 5, del D.Lgs. 152/2006[1] assume carattere non eludibile.

[1] MASE — Portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali VAS-VIA-AIA, procedura n. 13928: Sintesi non tecnica dello Studio di Impatto Ambientale (P442_R116_24 Rev. 1, 26/03/2025), https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Info/11715

## 2. Sintesi dell'applicazione del modello cumulativo del calore

L'analisi allegata (Allegato 1) applica ai dati pubblici delle procedure nn. 13928 e 14476 il modello cumulativo del calore per i data center, che scompone l'anomalia termica in componente d'impianto (trasformazione del suolo) e componente d'attività (calore di esercizio, eq. 17–23 del modello), con somma multi-sorgente per sovrapposizione lineare (eq. 29) e confronto con la soglia di rilevabilità satellitare di 0,05–0,1 °C. I risultati principali sono:

a) la componente d'impianto incrementale dell'ampliamento è nulla (assenza di nuovo consumo di suolo); la componente d'attività dell'ampliamento (calore medio operativo ≈ 11,8 MWth) produce un incremento termico di picco notturno di +0,01–0,03 °C a 1 km sotto la soglia di rilevabilità;

b) il cumulo termico di tutti gli impianti del quadrante, incluso AWS Zibido, misurato al sito di Rozzano, vale ~+0,015 °C di picco notturno (Tabella 1): non si forma un'isola di calore operativa regionale misurabile;

c) lo scenario di guasto comune (blackout con avvio simultaneo dei generatori di emergenza di Noovle e AWS, distanti 3,5 km) è termicamente irrilevante (~0,004 °C reciproco), ma critico sul piano emissivo e acustico;

d) le criticità effettive in prossimità dell'isola di calore milanese preesistente sono quindi di natura non termica: acustica, emissiva episodica, idrica e di consumo di suolo dei campus greenfield vicini.

*Tabella 1 — Contributo di ciascun impianto al ΔLST misurato al sito Noovle di Rozzano (modello cumulativo del calore, eq. 29; picco notturno, condizioni stabili)*

| Impianto | Distanza | Q termico medio stimato | ΔLST al sito Rozzano |
|---|---|---|---|
| AWS Zibido (Edificio A) — proc. 14476 | ~3,5 km | ~32 MWth | ~+0,001 °C (potenza IT stimata dal dimensionamento del backup: assunzione dichiarata) |
| K2 Strategic — Zibido Badile | ~4,4 km | ~350 MWth | ~+0,009 °C |
| APTO — Lacchiarella | ~6 km | ~260 MWth | ~+0,003 °C |
| Stack Campus — Siziano (PV) | ~7 km | ~91 MWth | ~+0,001 °C |
| Noviglio | ~8 km | ~46 MWth | <+0,001 °C |
| Cumulo totale (eq. 29) | — | ~780 MWth | ~+0,015 °C — sotto la soglia di rilevabilità satellitare (0,05–0,1 °C) |

*Il risultato è robusto: anche raddoppiando la potenza IT stimata di AWS il cumulo resta al di sotto della soglia. La stima termica non deve però essere utilizzata per archiviare la valutazione cumulativa:*

*essa circoscrive il canale termico e rende obbligatoria la valutazione cumulativa sulle matrici rimanenti.*

## 3. Osservazioni puntuali

### Osservazione 1 — Assenza di una valutazione quantitativa dell'effetto termico («isola di calore»)

Lo Studio di Impatto Ambientale non modella l'effetto termico dell'opera né la sovrapposizione con l'isola di calore urbana dell'agglomerato milanese, dentro la quale il sito opererà per 25–40 anni. Si fa presente che la stessa Commissione Tecnica, nella procedura n. 14476 relativa al data center Amazon di Zibido San Giacomo, ha già richiesto con richiesta istruttoria MASE-2026-0088893 uno studio quantitativo dell'effetto isola di calore, con bilancio in MWth, modellazione del pennacchio, scenari di ondata di calore e di inversione termica e valutazione cumulativa «con APTO, K2, Rozzano, sottostazioni e altri impianti»2: il proponente Amazon ha depositato in data 01/07/2026 un'«Integrazione 7 – Effetto isola di calore». Per coerenza istruttoria e parità di trattamento, la medesima integrazione deve essere richiesta anche per la procedura n. 13928, pena un'asimmetria di valutazione tra impianti del medesimo quadrante.[2]

### Osservazione 2 — Valutazione di incidenza cumulativa ex art. 5, comma 5, D.Lgs. 152/2006

Con cinque data center in procedura o in esercizio entro 8 km e due procedure istruttorie simultanee su impianti distanti 3,5 km (nn. 13928 e 14476), la valutazione cumulativa non è assolvibile con il richiamo generico presente negli elaborati progettuali. Si chiede una valutazione cumulativa quantitativa e unitaria del quadrante sud-ovest milanese che copra: (i) bilancio termico in MWth e modellazione della dispersione del calore di esercizio e degli scenari episodici; (ii) matrice aria, con la sovrapposizione temporale delle prove dei generatori di emergenza dei diversi operatori; (iii) bilancio idrico cumulato, considerato che AWS Zibido ricorre a pozzi su falda superficiale (1–2,5 m) mentre Noovle si approvvigiona da acquedotto con scarico in Roggia Pizzabrasa; (iv) consumo di suolo cumulato, tenendo conto che l'area di Zibido San Giacomo è qualificata brownfield dal proponente e contestata come consumo di suolo verde dal MASE in un ambito «già fortemente impermeabilizzato».2

### Osservazione 3 — Coordinamento territoriale delle prove dei generatori di emergenza

Le prove dei gruppi elettrogeni di Noovle (mensili/trimestrali, fino a 16 gruppi simultanei, ~24 h/anno per gruppo) e di AWS Zibido (bisettimanali, in sequenza) ricadono sul medesimo bacino di qualità dell'aria non conforme per PM10. La Commissione Tecnica ha già richiesto nella procedura n. 14476 un calendario territoriale delle prove coordinato almeno tra Amazon, APTO e K2.2 Si chiede che il coordinamento sia esteso a Noovle Rozzano, con divieto di

[2]MASE — Portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali VAS-VIA-AIA, procedura n. 14476: SIA e integrazioni (rev. 30/06/2026), richiesta CTVA MASE-2026-0088893, https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Info/11970

sovrapposizione programmata delle prove, finestre concordate con ARPA Lombardia in condizioni di dispersione favorevole e divieto di prove durante gli episodi di allerta calore e di superamento dei limiti di PM10: è nelle ondate di calore, infatti, che la probabilità di avvio d'emergenza dei generatori e la formazione di ozono fotochimico sono massime.

### Osservazione 4 — Compatibilità acustica: prescrizioni vincolanti e verifica post-operam

Lo Studio di Impatto Ambientale rileva impatto acustico significativo allo stato previsionale: superamento dei limiti assoluti notturni (fino a 56,5 dB(A) contro 55 dB(A)) e dei differenziali (fino a 11,4 dB(A) contro 3–5 dB(A)) presso i recettori, che sono confinanti con il data center. Le mitigazioni progettuali (barriera acustica di 4 m sul confine sud, insonorizzazione dei chiller di almeno 7 dB(A), ricollocazione in copertura dei chiller dell'Edificio H) devono essere assunte nel decreto come prescrizioni vincolanti e non come mere previsioni, con obbligo di verifica fonometrica post-operam ai recettori più esposti in condizioni di pieno carico termico estivo.

### Osservazione 5 — Risorsa idrica e tutela della Roggia Pizzabrasa

Il fabbisogno idrico attuale è di 55.800 m³/anno da acquedotto; il fabbisogno addizionale per il raffreddamento delle nuove sale non è quantificato negli elaborati e, se evaporativo o adiabatico, può raggiungere l'ordine di 70.000–130.000 m³/anno (stima da WUE di settore sulla domanda IT media), oltre il doppio del prelievo attuale. Si chiede l'integrazione istruttoria con la dichiarazione del WUE di progetto, la prescrizione di raffreddamento a secco o ibrido con WUE misurato e pubblicato, e il monitoraggio di portata e temperatura dello scarico S03 in Roggia Pizzabrasa nei mesi di magra.

### Osservazione 6 — Monitoraggio post-operam e falsificabilità delle previsioni

Si chiede che il decreto preveda: (i) monitoraggio termico satellitare (LST Landsat 8/9 e Sentinel-3 SLSTR) su anelli a 0,5/1/2/5 km dal campus, con siti di controllo nel Parco Agricolo Sud e soglie di verifica pre-registrate (intervento istruttorio correttivo se la LST residua oltre 1 km supera +0,5 °C sottratto il trend dei controlli); (ii) 2–4 stazioni microclimatiche a terra normalizzate su ARPA Lombardia; (iii) registro pubblico di prove ed emergenze dei generatori (orari, numero di gruppi, condizioni meteo), propedeutico al calendario coordinato di cui all'Osservazione 3; (iv) verifica acustica e idrica di cui alle Osservazioni 4 e 5.

## 4. Richieste

R1 — Integrazione istruttoria con studio quantitativo dell'effetto termico (bilancio in MWth, modellazione del pennacchio, scenari di ondata di calore e inversione), in coerenza con la richiesta MASE-2026-0088893 già formulata nella procedura n. 14476;

R2 — Valutazione cumulativa quantitativa unitaria del quadrante sud-ovest milanese (procedure nn. 13928 e 14476, APTO Lacchiarella, K2 Strategic Zibido, Stack Siziano, Noviglio) sulle matrici termica, aria, acqua e suolo, ai sensi dell'art. 5, comma 5, D.Lgs. 152/2006;

R3 — Istituzione di un calendario territoriale coordinato delle prove dei generatori di emergenza tra Noovle, Amazon, APTO e K2, con divieto di sovrapposizione programmata e divieto di prove durante allerte calore ed episodi smog;

R4 — Assunzione delle mitigazioni acustiche come prescrizioni vincolanti del decreto, con verifica fonometrica post-operam ai recettori;

R5 — Dichiarazione del WUE di progetto, raffreddamento a secco o ibrido con WUE misurato e pubblicato, monitoraggio dello scarico in Roggia Pizzabrasa nei mesi di magra;

R6 — Piano di monitoraggio post-operam con soglie di falsificazione pre-registrate e registro pubblico delle prove dei generatori.

## 5. Conclusioni

L'analisi tecnica allegata dimostra che l'incremento termico operativo dell'ampliamento, anche in cumulo con il data center AWS di Zibido San Giacomo e con gli altri impianti del quadrante, resta di un ordine di grandezza inferiore alla soglia di rilevabilità satellitare: la dicitura «nessuna alterazione del clima locale» andrebbe però sostituita dalla formulazione tecnicamente corretta, l'ampliamento non aggiunge un'anomalia termica rilevabile al di fuori del perimetro, dato che il gradino termico del costruito esiste ed è già misurabile da satellite sul campus attuale. Le pressioni aggiuntive significative, e quindi l'oggetto delle prescrizioni richieste, sono acustiche, emissive episodiche, idriche e di consumo di suolo cumulato. Nel chiedere l'accoglimento delle osservazioni e delle richieste R1–R6, il sottoscritto si rende disponibile a integrazioni tecniche e resta in attesa di riscontro.

**Allegati:**

Allegato 1 — «Applicazione del modello cumulativo del calore al data center Noovle di Rozzano (MI)»: analisi tecnica con valutazione cumulativa integrata del data center AWS di Zibido San Giacomo (14 pagine).

Allegato 2 — «Teoria del modello cumulativo del calore per i data center», a cura di V. Lepori, prima edizione, novembre 2026.

# Bibliografia

[1] D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 e s.m.i. — Norme in materia ambientale: art. 5 (valutazione di impatto ambientale e incidenza cumulativa) e art. 24 (consultazione e osservazioni).

[2] Lepori, V. (a cura di) (2026). Teoria del modello cumulativo del calore per i data center — derivazione dal metodo Cambridge e protocollo applicativo per la valutazione d'impatto termico. Prima edizione, novembre 2026.

[3] MASE — Portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali VAS-VIA-AIA, procedura n. 13928 (ampliamento datacenter Noovle, Rozzano): SNT dello SIA (P442_R116_24 Rev. 1, 26/03/2025). https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Info/11715

[4] MASE — Portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali VAS-VIA-AIA, procedura n. 14476 (datacenter AWS Edificio A, Zibido San Giacomo): SIA e integrazioni (rev. 30/06/2026), richiesta CTVA MASE-2026-0088893. https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Info/11970

[5] Marinoni, A., et al. (2026). The data heat island effect: quantifying the impact of AI data centers on land surface temperature. Preprint arXiv:2603.20897.

[6] Briggs, G. A. (1975). Plume rise predictions. In Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses. American Meteorological Society; Hanna, S. R., Briggs, G. A., Hosker, R. P. (1982). Handbook on Atmospheric Diffusion. DOE/TIC-11223; Pasquill, F. (1961). The estimation of the dispersion of windborne material. The Meteorological Magazine, 90, 33–49.

Zibido San Giiacomo, lì 6 novembre 2026

Vincenzo Lepori

ANALISI TECNICA · NOVEMBRE 2026

# Applicazione del modello cumulativo del calore al data center Noovle di Rozzano (MI)

Valutazione dell'impatto termico dell'ampliamento con il modello cumulativo del calore (componenti A e B, eq. 15–23), scenario cumulativo con il data center AWS di Zibido San Giacomo e gli altri impianti del quadrante, ed evidenziazione delle criticità in prossimità dell'isola di calore

Procedura VIA MASE n. 13928 — “Ampliamento del datacenter Noovle di Rozzano (MI): installazione di gruppi elettrogeni di emergenza di potenza complessiva superiore a 150 MWt (270 MWt)” — Proponente: Noovle Società Benefit S.p.A. Scenario cumulativo con la procedura VIA MASE n. 14476 — “Regione AWS Europe (Milan) – Espansione – Datacenter Edificio A nel comune di Zibido San Giacomo (MI)” — Proponente: Amazon Data Services Italy S.r.l.

*Documento di scenario a supporto del dibattito pubblico e della fase istruttoria: non costituisce misura sul territorio né parere tecnico-ambientale ufficiale.*

# Indice

1 · Premessa, metodo e fonti....2
2 · Il progetto Noovle di Rozzano: dati di base....3
3 · Applicazione del modello cumulativo del calore....4
3.1 Componente A — calore dell'impianto....4
3.2 Componente B — calore dell'attività....5
3.3 Generatori di emergenza: scenari episodici....6
3.4 Somma e confronto con il metodo Cambridge....7
3.5 Scenario cumulativo multi-impianto (eq. 29)....8
4 · Criticità in prossimità dell'isola di calore....9
4.1 Popolazione confinante al sito....9
4.2 Rumore e co-locazione delle sorgenti....9
4.3 Qualità dell'aria e coincidenza dei picchi....10
4.4 Risorsa idrica e Roggia Pizzabrasa....10
4.5 Cumulo con gli altri data center del quadrante sud, incluso AWS Zibido....11
4.6 Cambiamento climatico e isola di calore milanese....12
5 · Confronto con la valutazione dello Studio di Impatto Ambientale....12
6 · Protocollo di monitoraggio e falsificazione....13
7 · Limiti e conclusioni....14
Bibliografia....15

# 1 · Premessa, metodo e fonti

Questo documento applica il **modello cumulativo del calore** — il modello cumulativo del calore per i data center derivato come correzione strutturale del metodo Cambridge[1] — all'ampliamento del data center Noovle di Rozzano (MI), oggetto della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale MASE n. 13928, avviata il 12/05/2025 e in supplemento di istruttoria tecnica CTVIA, con scadenza delle osservazioni al 07/11/2026.[2]

Il modello scompone l'anomalia termica di un data center in due componenti fisicamente distinte (eq. 15): la componente A, legata alla trasformazione del suolo e degli edifici (albedo, evapotraspirazione perduta, inerzia termica), permanente e confinata al footprint e al primo chilometro; e la componente B, il calore di esercizio proporzionale alla potenza elettrica (eq. 17), rilasciato in quota e disperso secondo la teoria del pennacchio turbolento (eq. 18–23). Per più impianti vicini i campi si sovrappongono linearmente (eq. 29). Il trend climatico regionale va rimosso con siti di controllo prima della somma; le stime sono date come intervalli con incertezza propagata in quadratura (eq. 24) e confrontate con la soglia di rilevabilità satellitare di 0,05–0,1 °C (eq. 25).

I dati di progetto sono desunti dalla Sintesi Non Tecnica dello Studio di Impatto Ambientale (relazione P442_R116_24 Rev. 1 del 26/03/2025) e dagli atti pubblici della procedura sul portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali del MASE.2 Il sito (Centro Telecomunicazioni MI-SUD, Viale Toscana 3–5 / Via Leonardo da Vinci 1, Rozzano; 45,3816 N — 9,1621 E) è un campus esistente in area completamente urbanizzata, e questo fatto cambia strutturalmente l'applicazione del modello rispetto ai campus greenfield dell'Appendice C del saggio (APTO e K2 Strategic nel Parco Agricolo Sud Milano). Per la valutazione cumulativa si integra il data center Amazon in istruttoria a Zibido San Giacomo (procedura VIA MASE n. 14476, avvio 06/01/2026), il cui sito sulla SP390 dista solo ~3,5 km dal campus Noovle: è l'impianto in procedura più vicino a Rozzano.3

# 2 · Il progetto Noovle di Rozzano: dati di base

L'ampliamento non prevede nuovi edifici: converte a sale dati spazi esistenti (Edificio A, ex parcheggio/deposito, ~7.000 m²; Edificio H, ex uffici, ~1.000 m²; Edificio F, rifacimento, ~600 m²) e installa 23 nuovi gruppi elettrogeni (GE) a gasolio da 3.000 kVA (6.403 kWt ciascuno), 23 serbatoi interrati e 36 chiller. La potenza termica complessiva dei GE del sito sale a ~270 MWt. I parametri rilevanti per il modello sono raccolti in Tabella 1.

[1]Lepori, V. (a cura di) (2026). Teoria del modello cumulativo del calore per i data center — derivazione dal metodo Cambridge e protocollo applicativo per la valutazione d'impatto termico. Prima edizione, novembre 2026.

[2]MASE — Portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali VAS-VIA-AIA, procedura n. 13928: Sintesi non tecnica dello Studio di Impatto Ambientale (P442_R116_24 Rev. 1, 26/03/2025), https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Info/11715

*Tabella 1 — Parametri del progetto Noovle Rozzano rilevanti per il modello cumulativo del calore (fonte: SNT dello SIA, proc. VIA MASE n. 13928)*

| Parametro | Valore | Nota |
|---|---|---|
| Nuova potenza IT (Ed. F + A + H) | 11,65 MW | 1,65 + 7,5 + 2,5 MW; Tier IV |
| Potenza elettrica totale dichiarata | 16,8 MW | 2,3 + 11 + 3,5 MW |
| PUE implicito da progetto | ≈1,44 | 16,8/11,65; Noovle dichiara PUE < 1,3 per i DC Tier IV4 |
| Nuovi gruppi elettrogeni | 23 GE ≈ 147 MWt | 3.000 kVA / 6.403 kWt ciascuno |
| GE + DRUPS esistenti | ≈114 MWt | 17 GE (74,3 MWt) + 8 DRUPS (40,1 MWt) |
| Potenza termica totale post-ampliamento | ≈270 MWt | Solo backup: test mensili/trimestrali ed emergenze |
| Nuovi chiller | 36 | In copertura (quota di rilascio ~10 –15 m) |
| Regime di prova dei GE | ~24 h/anno per GE | Test mensili 120 min a vuoto; trimestrali 120 min a carico; max 16 GE simultanei (Ed. A) |
| Approvvigionamento idrico attuale | 55.800 m³/anno | Acquedotto pubblico; scarico acque bianche in Roggia Pizzabrasa |
| Nuovo consumo di suolo | Nullo | Edifici esistenti; nessuna nuova impermeabilizzazione |
| Contesto | Agglomerato di Milano | Alta densità abitativa; PM10 già oltre standard; inversioni termiche frequenti |

Lo Studio di Impatto Ambientale segnala inoltre: abitazioni delle frazioni più prossime confinanti con il data center; impatto acustico significativo allo stato previsionale (fino a 56,5 dB(A) notturni contro il limite di 55; differenziale fino a 11,4 dB(A) contro 3–5) con mitigazioni (barriera acustica di 4 m sul confine sud, insonorizzazione dei chiller di almeno 7 dB(A), spostamento dei chiller dell'Edificio H in copertura); sistemi SCR su tutti i generatori; 380 kWp di fotovoltaico compensativo. I data center in procedura VIA più vicini sono: AWS Zibido San Giacomo (~3,5 km, procedura n. 14476), K2 Strategic a Zibido–Badile (~4,4 km, fino a 400 MW), APTO Lacchiarella (~6 km), Stack Campus Siziano (~7 km) e Noviglio (~8 km).

# 3 · Applicazione del modello cumulativo del calore

L'applicazione segue l'algoritmo di Appendice B del saggio: componente A dal bilancio energetico di superficie (eq. 8, 16), componente B dalla catena potenza → galleggiamento → dispersione → frazione al suolo (eq. 17–23), somma cumulativa (eq. 15), sovrapposizione multi-sorgente (eq. 29), incertezza in quadratura (eq. 24) e confronto con la soglia di rilevabilità (eq. 25).

## 3.1 Componente A — calore dell'impianto

La componente A nasce dalla transizione di copertura del suolo (seminativo → tetti e asfalto): nel caso APTO essa produce +3–6 °C di media annua diurna sul footprint e ~+0,3 °C a 1 km. A Rozzano la transizione è già avvenuta decenni fa: il campus è costruito, l'ampliamento non impermeabilizza nuovo suolo e la conversione di ~8.600 m² interni da parcheggio/uffici a sale dati non modifica albedo né evapotraspirazione del comparto. La componente A incrementale dell'ampliamento è quindi nulla entro la sensibilità del modello ($\Delta LST,A \approx 0$ °C).

Resta un punto metodologico essenziale: la componente A del campus esistente è già incorporata nella baseline termica urbana e nell'isola di calore milanese preesistente. Qualunque verifica satellitare futura dovrà quindi leggere il sito come “controllo costruito” — un pixel già urbano — e non come un passaggio da verde a costruito: attribuire all'ampliamento il gradino LST preesistente ripeterebbe l'errore di attribuzione criticato nel metodo Cambridge.

## 3.2 Componente B — calore dell'attività

Tutta l'energia elettrica assorbita diventa calore (eq. 17): $Q = P_{IT} \times PUE = 16{,}8$ MWth a pieno carico; con fattore di carico $f_s = 0{,}7$ il calore medio operativo è $Q_s \approx 11{,}8$ MWth — circa 1/22 del campus di riferimento da 300 MW del saggio (260 MWth). La catena di calcolo è in Tabella 2.

*Tabella 2 — Catena di calcolo della componente B per l'ampliamento Noovle (eq. 17–23)*

| Passaggio | Eq. | Valore |
|---|---|---|
| Calore dissipato a pieno carico $Q = P_{IT} \times PUE$ | (17) | 16,8 MWth |
| Calore medio operativo $Q_s = f_s \times Q$ | — | ≈11,8 MWth |
| Parametro di galleggiamento F | (20) | ≈106 $m^4/s^3$ (campus 300 MW: ≈2.400) |
| Innalzamento in regime stabile ($S = 5\times10^{-4}\ s^{-2}$, u = 1,5 m/s) | (21) | ≈135 m → quota efficace H ≈ 147 m |
| $\sigma_y$, $\sigma_z$ a 1 km, classe F (notte serena) | (22) | ≈93 m, ≈51 m |
| Frazione al suolo $f_g$ (H = 60–147 m) | (19) | 1–5% (banda prudenziale del saggio) |

| Passaggio | Eq. | Valore |
|---|---|---|
| | | |
| ΔT_B a 1 km, picco notturno classe F | (23) | +0,007 – 0,03 °C |
| ΔT_B a 1 km, media annua (classi F ≈ 20% delle ore) | (23) | +0,002 – 0,006 °C |

*Tabella 3 — ΔLST atteso dell'ampliamento per distanza (modello cumulativo del calore, eq. 15; componente A incrementale ≈ 0)*

| Distanza | Picco orario (notte, classe F) | Media annua | Valutazione |
|---|---|---|---|
| Sul footprint | Flusso locale ~1.300–1.950 W/m² sulle nuove sale | — | Locale, presso i chiller in copertura |
| 0,5 km | ~+0,03 °C | ~+0,006 °C | Sotto soglia di rilevabilità |
| 1 km | +0,007 – 0,03 °C | +0,002 – 0,006 °C | Sotto soglia (eq. 25) |
| 2 km | ~+0,002 °C | ~+0,001 °C | Trascurabile |
| ≥ 5 km | < 0,001 °C | < 0,001 °C | Non misurabile |

L'esito è condizionato dalla scala: con Q_s ventidue volte inferiore al campus di riferimento, il pennacchio di calore dell'ampliamento è interamente disaccoppiato dal suolo nelle ore convettive e, nelle notti serene di classe F — frequenti nell'Agglomerato di Milano, come lo stesso SIA ricorda — l'interazione al suolo resta nell'ordine dei centesimi di grado nel primo chilometro. La previsione è quindi, per il modello, “nessun effetto misurabile” oltre il perimetro: va dichiarata tale (eq. 25) e non sommata ad altre fonti per produrre allarme.

## 3.3 Generatori di emergenza: scenari episodici

I 270 MWt dei GE non sono un carico continuo: funzionano in test programmati (~24 h/anno per generatore) e in emergenza. Assumendo che ~60% della potenza termica motore divenga calore sensibile rilasciato, gli scenari episodici danno (Tabella 4):

*Tabella 4 — Scenari episodici dei gruppi elettrogeni (eq. 18–23; stima realistica con innalzamento del pennacchio)*

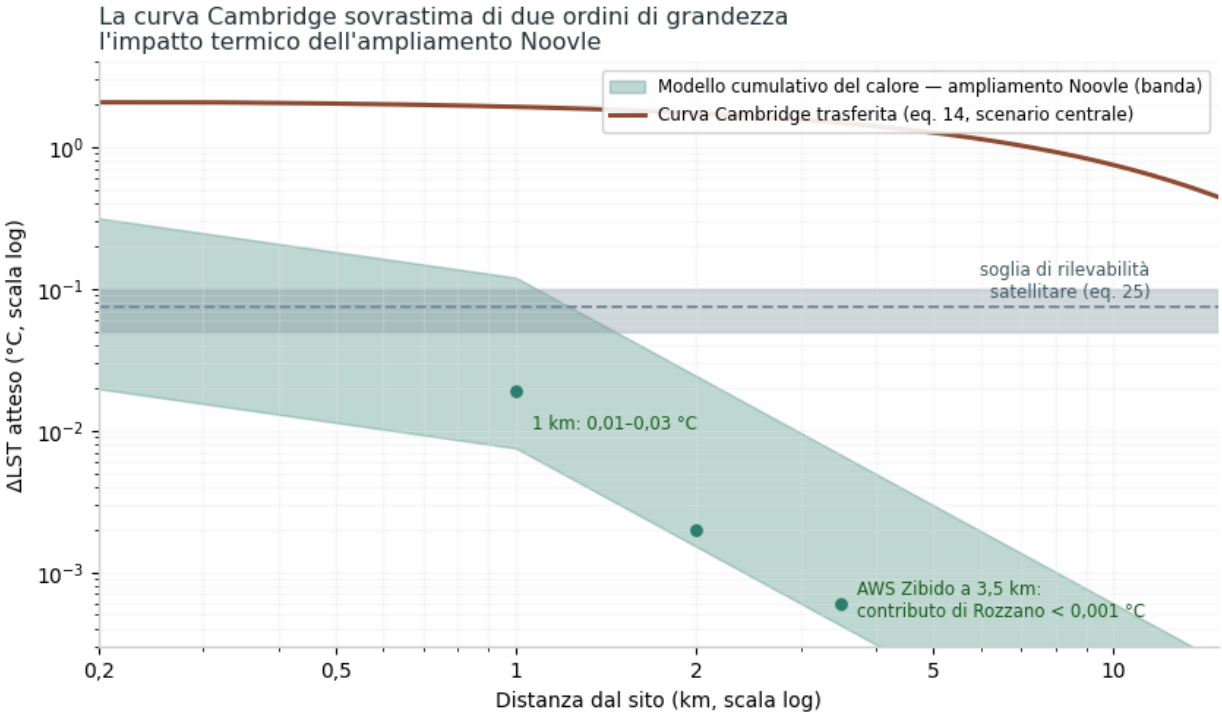
| Scenario | Calore rilasciato | ΔT a 1 km | Carattere |
|---|---|---|---|
| Test trimestrale Ed. A — 16 GE, 120 min, diurno (classe B) | ≈62 MWth | < 0,01 °C | Episodico programmato |
| Emergenza blackout — tutti | ≈162 MWth | < 0,001 °C | Evento raro |

| Scenario | Calore rilasciato | ΔT a 1 km | Carattere |
|---|---|---|---|
| i GE (270 MWt), diurno (classe D) | | | |
| Emergenza blackout — notturno (classe F) | ≈162 MWth | ~+0,09 °C (prudenziale); ≪0,01 °C con pieno innalzamento | Evento raro, poche ore |

Anche nello scenario più severo (blackout notturno con inversione) l'incremento termico resta episodico e al più dell'ordine dei decimi di grado nel primo chilometro. In questi episodi il canale di impatto dominante non è termico ma emissivo (NOx e PM10 in condizioni di bassa ventilazione): è la stessa conclusione dello SIA, qui confermata dal lato termico.

## 3.4 Somma e confronto con il metodo Cambridge

Applicare al sito la curva dose-risposta dello studio Cambridge (eq. 14, scenario centrale $\Delta T_0$ = 2,07 °C)[3] darebbe ~+1,9 °C a 1 km e ~+1,2 °C ancora a 10 km. Il modello cumulativo del calore dà, per l'ampliamento, +0,01–0,03 °C a 1 km: un rapporto di ~100:1 che cresce con la distanza (Figura 1). La divergenza è risolvibile sperimentalmente con il protocollo del capitolo 6: le due previsioni differiscono di due ordini di grandezza in un intervallo pienamente accessibile alla misura.




[3]MASE — Portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali VAS-VIA-AIA, procedura n. 14476: "Regione AWS Europe (Milan) – Espansione – Datacenter Edificio A nel comune di Zibido San Giacomo (MI)", avvio 06/01/2026, istruttoria tecnica CTVIA; SIA e integrazioni (rev. 30/06/2026), richiesta CTVA MASE-2026-0088893, https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Info/11970

*Figura 1 — ΔLST atteso in funzione della distanza: modello cumulativo del calore applicato all'ampliamento Noovle (banda) contro la curva Cambridge trasferita (eq. 14). La linea tratteggiata è la soglia di rilevabilità satellitare (eq. 25).*

*Tabella 5 — Confronto quantitativo sulla configurazione reale del sito*

| Metrica | Cambridge trasferita (S2) | Modello cumulativo del calore | Nota |
|---|---|---|---|
| ΔT a 1 km | ~+1,9 °C | +0,01 – 0,03 °C (picco) | Rapporto ~100:1 |
| ΔT a 5 km | ~+1,6 °C | < 0,001 °C | Sotto soglia |
| ΔT a 10 km | ~+1,2 °C | ≈ 0 | Non misurabile |
| Sorgente dominante | Segnale aggregato non scomposto | A ≈ 0 (sito già costruito); B episodica | Baseline urbana preesistente |
| Falsificabilità locale | Assente | Soglie eq. 25 + DiD con controlli | Protocollo cap. 6 |

Va esplicitato il limite dell'esercizio Cambridge: il campione dello studio è composto in larga parte da impianti piccoli su suolo precedentemente non urbano; trasferirne la media a un ampliamento senza nuovo consumo di suolo, dentro l'agglomerato milanese, è un'estrapolazione priva di giustificazione meccanicistica. Anche l'ancoraggio empirico di Uruguay[4] (83% del segnale da copertura del suolo, 17% da esercizio) qui sovrastimerebbe: la quota "edificio" è già tutta nella baseline.

## 3.5 Scenario cumulativo multi-impianto (eq. 29)

Il modello si estende per sovrapposizione lineare dei campi delle singole sorgenti (eq. 29). Si valuta qui il campo cumulativo misurato al sito di Rozzano — il recettore urbano più esposto del quadrante — includendo il data center Amazon di Zibido San Giacomo (VIA MASE n. 14476, proponente Amazon Data Services Italy S.r.l.): 19 gruppi elettrogeni (16 da 2,8 MWe per le sale dati e 3 "house" da 0,8 MWe), potenza termica dichiarata ~139 MWt, raffreddamento alimentato da pozzi su falda superficiale (1–2,5 m), test bisettimanali in sequenza senza accensioni contemporanee.3 La potenza IT non è pubblica nella documentazione di sintesi: la si stima in ~40 MW dal dimensionamento del backup (16 × 2,8 MWe = 44,8 MWe), con PUE 1,14 dichiarato da AWS a livello globale per il 20255 — assunzione dichiarata, coerente con la regola delle stime a intervallo. La Tabella 6 riporta i contributi, scalando il kernel spaziale pubblicato nel saggio (tabella C6: +0,6 °C a 0,5 km, +0,15 °C a 1 km, +0,04 °C a 2 km, +0,001 °C a 10 km per 260 MWth) sulla potenza termica media Q_s di ciascun impianto.

[4]Noovle S.p.A., sezione Data Center del sito istituzionale: PUE inferiore a 1,3 dichiarato per i data center Tier IV (Roma Ovest, Milano Sud). https://www.noovle.com/it/datacenter/

*Tabella 6 — Contributo di ciascun impianto al ΔLST misurato al sito Noovle di Rozzano (modello cumulativo del calore, eq. 29; picco notturno classe F)*

| Impianto | Distanza | Q_s stimato | ΔT_B al sito Rozzano |
|---|---|---|---|
| AWS Zibido (Edificio A) — VIA 14476 | ~3,5 km | ~32 MWth | ~+0,001 °C (IT ~40 MW e PUE 1,14: assunzione dichiarata) |
| K2 Strategic — Zibido Badile | ~4,4 km | ~350 MWth | ~+0,009 °C (400 MW, parametri del saggio) |
| APTO — Lacchiarella | ~6 km | ~260 MWth | ~+0,003 °C (300 MVA, parametri del saggio) |
| Stack Campus — Siziano (PV) | ~7 km | ~91 MWth | ~+0,001 °C (100 MW IT ipotizzati, prudenziale) |
| Noviglio | ~8 km | ~46 MWth | <+0,001 °C (50 MW IT ipotizzati, prudenziale) |
| Cumulo totale (eq. 29) | — | ~780 MWth | ~+0,015 °C — sotto la soglia di rilevabilità (eq. 25) |

Anche sommando tutte le sorgenti del quadrante — incluse le due più grandi, APTO e K2, e la più vicina, AWS Zibido — il picco notturno cumulato al sito di Rozzano resta ~+0,015 °C, un ordine di grandezza sotto la soglia di rilevabilità: non si forma un'isola di calore operativa regionale, confermando per questo quadrante il risultato del saggio per l'asse APTO –K2. Il risultato è robusto alle assunzioni: anche raddoppiando la potenza IT stimata di AWS il cumulo resterebbe sotto soglia. Lo stesso vale nella direzione opposta: il contributo dell'ampliamento Noovle (Q_s = 11,8 MWth) sui recettori di Zibido e Lacchiarella è inferiore al millesimo di grado. Va però registrato che nella procedura AWS la Commissione tecnica ha chiesto espressamente uno studio quantitativo dell'effetto isola di calore e la modellazione degli effetti cumulativi “con APTO, K2, Rozzano, sottostazioni e altri impianti”, e che il proponente ha depositato il 1° luglio 2026 un'“Integrazione 7 – Effetto isola di calore”3: la richiesta istruttoria di bilanci termici quantitativi — bilancio in MWth, modellazione del pennacchio, scenari di ondata di calore e inversione — coincide esattamente con la struttura del modello qui applicato.

Scenario di guasto comune. La CTVA della procedura AWS ha richiesto di modellare il guasto comune della stazione o della rete con avvio simultaneo dei data center del quadrante.3 Dal lato termico il modello dà: Noovle (270 MWt → ~162 MWth) e AWS (139 MWt → ~83 MWth) sono a 3,5 km l'uno dall'altro; il contributo episodico reciproco è dell'ordine di 0,004 °C — termicamente irrilevante. La criticità dello scenario di guasto comune resta interamente sul piano emissivo (NOx, PM10 in bassa ventilazione) e acustico, non su quello del calore disperso.

# 4 · Criticità in prossimità dell'isola di calore

Il modello cumulativo del calore circoscrive l'impronta termica dell'ampliamento al footprint e sposta il baricentro delle criticità reali sui recettori dell'anello interno (0–1 km), dove il sito si innesta in un'isola di calore urbana preesistente. Le criticità, in doppia lettura (scenario massimale Cambridge / modello cumulativo del calore), sono raccolte di seguito e sintetizzate in Tabella 7.

## 4.1 Popolazione confinante al sito

A differenza dei campus greenfield del Parco Agricolo Sud, qui i recettori residenziali sono immediatamente a ridosso: lo SIA dichiara che la popolazione potenzialmente interessata è “limitata alle abitazioni delle frazioni più prossime, confinanti al datacenter”, in un'area a densità superiore a 3.000 abitanti/km² (Rozzano conta ~41.700 residenti). Per il modello cumulativo del calore l'incremento termico di esercizio a carico di questi recettori è di centesimi di grado, sotto soglia: non si configura un'esposizione sanitaria da calore operativo. La criticità reale è la somma con la baseline: notti tropicali e ondate di calore dell'agglomerato milanese partono già da un “pavimento” urbano elevato, e le fasce fragili (età mediana alta, densità abitativa) rendono l'anello interno il recettore prioritario del monitoraggio, non dell'allarme termico.

## 4.2 Rumore e co-locazione delle sorgenti

Le sorgenti della componente B (i 36 nuovi chiller in copertura) coincidono fisicamente con le sorgenti acustiche che lo SIA valuta già significative: superamento dei limiti assoluti notturni (fino a 56,5 dB(A) contro 55) e dei differenziali (fino a 11,4 dB(A) contro 3–5) presso i recettori, con mitigazioni obbligate (barriera di 4 m a sud, insonorizzazione ≥7 dB(A), chiller dell'Edificio H spostati in copertura). La co-locazione ha una conseguenza pratica: lo stesso anello di recettori entro ~300–500 m è esposto al canale acustico continuo, che — a differenza del canale termico — è misurabile, normato e già oltre i limiti allo stato previsionale. È questa la criticità certa dell'isola di calore locale: non il grado in più, ma il rumore delle macchine che lo producono.

## 4.3 Qualità dell'aria e coincidenza dei picchi

L'area ricade nell'Agglomerato di Milano, con standard PM10 già superati allo stato attuale e meteorologia sfavorevole alla dispersione (vento debole, inversioni frequenti, lunghe fasi stabili di alta pressione — esattamente le condizioni di classe F in cui la componente B è massima). Il meccanismo critico è la coincidenza dei picchi: le ondate di calore stressano la rete elettrica, ed è in quelle ore che cresce la probabilità di avvio dei GE in emergenza e che si concentrano i test; si sovrappongono così calore episodico, NOx e PM10 nelle condizioni di massima formazione di ozono fotochimico. Gli SCR previsti su tutti i generatori mitigano il NOx, ma la prescrizione conseguente è operativa: finestre di test concordate con ARPA in condizioni di dispersione favorevole, divieto di test durante gli episodi di allerta calore/smag e

protocolli di manutenzione coordinati con gli altri operatori di data center dell'area, come già richiamato dalle Linee guida ministeriali citate nello SIA.

## 4.4 Risorsa idrica e Roggia Pizzabrasa

L'approvvigionamento attuale è da acquedotto (55.800 m³/anno, di cui 52.700 per usi industriali): il sito non compete con la falda superficiale e la rete dei fontanili come nel caso Lacchiarella–Zibido. Resta da verificare il fabbisogno addizionale di raffreddamento delle nuove sale: se evaporativo/adiabatico, con WUE 1,0–1,8 L/kWh su ~71 GWh/anno di domanda IT media, l'ordine di grandezza è 70.000–130.000 m³/anno — più del doppio del prelievo attuale dichiarato. Il recapito delle acque bianche in Roggia Pizzabrasa (scarico S03) rende il corpo idrico il recettore sensibile: portate estive magre e apporti di prima pioggia da un comparto interamente impermeabile vanno tenuti sotto controllo nel monitoraggio. Prescrizione conseguente: raffreddamento a secco o ibrido con WUE dichiarato e misurato, e scarichi regolati nei mesi secchi.

## 4.5 Cumulo con gli altri data center del quadrante sud, incluso AWS Zibido

Entro 8 km dal sito sono in procedura cinque impianti; il più vicino è ora il data center Amazon di Zibido San Giacomo (~3,5 km). Per il modello cumulativo del calore il cumulo termico (eq. 29, Tabella 6) resta sotto soglia: oltre 2 km ogni singolo contributo di componente B è inferiore al centesimo di grado e le componenti A restano confinate ai rispettivi footprint. Il cumulo che conta è di altro tipo, e il caso AWS lo dimostra in forma paradigmatica:

Emissivo: le prove dei GE di Noovle (mensili/trimestrali, fino a 16 gruppi simultanei), di AWS (bisettimanali, in sequenza) e dei campus APTO e K2 ricadono sullo stesso bacino PM10 non conforme; la CTVA della procedura AWS ha già richiesto un calendario territoriale delle prove coordinato almeno tra Amazon, APTO e K2, con divieto di sovrapposizione programmata, estendibile a Rozzano.3

Idrico: AWS raffredda con pozzi sulla falda superficiale (1–2,5 m) in un'area di risaie con storici problemi di allagamento; Noovle usa l'acquedotto. Le due scelte non competono direttamente, ma il bilancio idrico cumulato del quadrante (con APTO e K2 su falda e fontanili) va valutato unitariamente, come la CTVA ha già imposto ad Amazon.

Suolo: AWS Zibido insiste su un'area agricola ex estrazione di gas che il proponente qualifica brownfield e il MASE contesta come consumo di suolo verde “in un ambito già fortemente impermeabilizzato”3 — è la componente A del modello che si accumula nel quadrante, non la B. A differenza di Rozzano (componente A incrementale nulla), i campus greenfield sigillano seminativo: è lì che il gradino LST di +3–6 °C sul footprint si sommerà.

Termico: come mostrato al §3.5, il cumulo di tutte le componenti B misurato a Rozzano vale ~+0,015 °C di picco — non misurabile. La valutazione cumulativa obbligatoria va quindi chiesta sulle matrici aria, acqua, suolo e rumore, non sul calore disperso.

*Tabella 7 — Sintesi delle criticità in prossimità dell'isola di calore (anello 0–1 km da Rozzano; cumulo di quadrante)*

| Canale | Scenario massimale (Cambridge) | Modello cumulativo del calore (stima) | Valutazione |
|---|---|---|---|
| Calore operativo (B) | ~+1,9 °C a 1 km | +0,01–0,03 °C di picco | Divario ~100:1; decisiva la verifica di Fase 6 |
| Calore episodico GE | Non distinto | < 0,01–0,09 °C, poche ore | Prescrizioni su orari e condizioni dei test |
| Cumulo B di quadrante (con AWS) | Somma delle curve: gradi | ~+0,015 °C a Rozzano | Sotto soglia: no isola di calore operativa regionale |
| Rumore chiller/GE | Identico nei due approcci | Limiti già superati allo stato previsionale | Criticità certa: barriere e insonorizzazione vincolanti |
| Aria (NOx, PM10) | Identico nei due approcci | Episodico, area già non conforme PM10 | SCR + calendario prove coordinato tra operatori |
| Acqua | Identico nei due approcci | 70.000–130.000 m³/anno potenziali aggiuntivi | WUE misurato; tutela Roggia Pizzabrasa; bilancio cumulato di quadrante |
| Suolo | ~9.300 ha oltre 3 °C (scenario) | Nessun nuovo consumo a Rozzano; consumo certo ad AWS/APTO/K2 | Criticità spostata sui campus greenfield vicini |

### 4.6 Cambiamento climatico e isola di calore milanese

Il sito opererà per 25–40 anni dentro un'isola di calore urbana che le proiezioni per la Pianura Padana spostano di +1,5–2,5 °C a metà secolo. Due feedback riguardano direttamente l'ampliamento: (i) il feedback energetico — temperature esterne più alte degradano il PUE (ogni 0,1 di PUE sposta la componente B dell'8%) e riducono le ore di free-cooling; il dimensionamento andrebbe riferito al clima 2050–2060; (ii) la coincidenza dei picchi del §4.3, che un clima più caldo rende più frequente. Le soglie rilevanti per i recettori sono assolute (35 °C, notti tropicali): il contributo dell'ampliamento, per quanto piccolo, si somma a una baseline che sale — la valutazione corretta è su temperature assolute future, non sul solo Δ.

## 5 · Confronto con la valutazione dello Studio di Impatto Ambientale

Lo SIA del progetto non modella l'effetto termico — come del resto nessuna delle VIA italiane esaminate nel saggio — e conclude per impatti “non significativi” sulla salute dalla sola via emissiva. L'applicazione del modello cumulativo del calore conferma dal lato fisico

che il canale termico di esercizio è effettivamente trascurabile oltre il perimetro, ma mostra anche che la dicitura “nessuna alterazione del clima locale”, usata in altri procedimenti, sarebbe scorretta: il gradino termico del costruito esiste ed è già misurabile da satellite sul campus attuale (componente A storica). La formulazione tecnicamente corretta è: l'ampliamento non aggiunge un'anomalia termica rilevabile al di fuori del sito; le pressioni aggiuntive significative sono acustiche, emissive episodiche e idriche, e sono quelle che la istruttoria deve condizionare. Va registrato che nella parallela procedura AWS di Zibido la CTVA ha già elevato la stessa richiesta — studio quantitativo dell'isola di calore con bilancio in MWth, modellazione del pennacchio e scenario cumulativo con Rozzano — segno che il perimetro istruttorio ministeriale si sta allineando alla struttura del modello qui applicato.

## 6 · Protocollo di monitoraggio e falsificazione

Il protocollo del modello (capitolo 11 del saggio) va adattato a un sito esistente: non essendoci più un “pre” per la componente A, la verifica si concentra sulla componente B e sulle pressioni episodiche.

1. Baseline termica: serie LST Landsat 8/9 e Sentinel-3 SLSTR 2015–oggi su anelli a 0,5 / 1 / 2 / 5 km centrati sul campus; il sito funge da “controllo costruito” per i campus greenfield vicini, e i campi del Parco Agricolo Sud a sud-est come controlli naturali.

2. Stazioni microclimatiche: 2–4 stazioni a terra (sito, recettori residenziali a ridosso del confine sud, controllo agricolo), con normalizzazione sulle stazioni ARPA Lombardia dell'area.

3. Registro pubblico dei test e delle emergenze dei GE (orari, numero di gruppi, condizioni meteo), integrato nel calendario territoriale coordinato tra Noovle, Amazon, APTO e K2 già richiesto dalla CTVA nella procedura AWS: è il dato che rende falsificabile la stima episodica della Tabella 4 e abilita il coordinamento tra operatori.

4. Soglie di falsificazione pre-registrate: se dopo l'avvio delle nuove sale, sottratto il trend dei controlli (DiD, eq. 13), la LST residua oltre 1 km supera +0,5 °C, il modello va rivisto verso l'alto; se resta sotto +0,1 °C, la scomposizione è confermata e la curva Cambridge va riclassificata come effetto-edificio.

5. Metriche accessorie vincolanti: WUE misurato e pubblicato, portata e temperatura dello scarico S03 in Roggia Pizzabrasa nei mesi secchi, livelli acustici notturni ai recettori dopo l'installazione delle barriere.

## 7 · Limiti e conclusioni

Stima ex-ante: il PUE reale non è pubblico; la fascia 1,25–1,44 (implicito di progetto / dichiarazione Noovle) sposta la componente B di ±8% per 0,1 di PUE — senza cambiare gli ordini di grandezza.

La potenza IT preesistente del campus non è pubblica nella SNT: la componente B del sito esistente non è ricalcolabile con gli stessi dati, ma è interamente inclusa nella baseline urbana. Per AWS Zibido la potenza IT è stimata dal dimensionamento del backup (~40 MW): il cumulo di Tabella 6 è robusto anche raddoppiando tale stima.

Le parametrizzazioni di Briggs e Pasquill–Gifford portano un fattore 2–3 di incertezza a distanza, già incluso nelle fasce (eq. 24).

Il modello è statico: non cattura i feedback acqua–calore e PUE–clima discussi al §4.6, entrambi di amplificazione.

**Conclusioni.** Applicato ai dati della procedura VIA n. 13928, il modello cumulativo del calore prevede che l'ampliamento del data center Noovle di Rozzano produca un incremento termico di esercizio dell'ordine di +0,01–0,03 °C di picco notturno a 1 km e una componente di impianto incrementale nulla, essendo assente nuovo consumo di suolo: una previsione sotto la soglia di rilevabilità satellitare, da dichiarare "non misurabile" oltre il perimetro. L'integrazione del data center AWS di Zibido San Giacomo nella valutazione cumulativa (eq. 29) non cambia l'esito termico — il cumulo di tutti gli impianti del quadrante misurato a Rozzano vale ~+0,015 °C di picco, un ordine di grandezza sotto soglia — ma rafforza le criticità non termiche: il rumore continuo dei chiller in copertura (già oltre i limiti previsionali), gli episodi emissivi dei generatori diesel in un'area PM10 non conforme — resi più critici dalla coincidenza con le ondate di calore e dalla contemporaneità potenziale tra impianti vicini — la domanda idrica aggiuntiva e il consumo di suolo dei campus greenfield. Su questi canali, e sul calendario territoriale coordinato delle prove dei generatori tra Noovle, Amazon, APTO e K2 già evocato dalla CTVA, dovrebbero concentrarsi prescrizioni e monitoraggio delle istruttorie in corso.

—

*Analisi condotta con il modello cumulativo del calore (Lepori, 2026) su dati pubblici delle procedure VIA MASE n. 13928 e n. 14476. Documento di scenario: non costituisce misura sul territorio né parere tecnico-ambientale ufficiale.*

## Bibliografia

[1] Lepori, V. (a cura di) (2026). Teoria del modello cumulativo del calore per i data center — derivazione dal metodo Cambridge e protocollo applicativo per la valutazione d'impatto termico. Prima edizione, novembre 2026.

[2] MASE — Portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali VAS-VIA-AIA, procedura n. 13928 (ampliamento datacenter Noovle, Rozzano): Sintesi non tecnica dello Studio di Impatto Ambientale (P442_R116_24 Rev. 1, 26/03/2025). https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Info/11715

[3] MASE — Portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali VAS-VIA-AIA, procedura n. 14476 (datacenter AWS Edificio A, Zibido San Giacomo): SIA e integrazioni (rev. 30/06/2026), richiesta CTVA MASE-2026-0088893. https://va.mite.gov.it/it-IT/Oggetti/Info/11970

[4] Marinoni, A., et al. (2026). The data heat island effect: quantifying the impact of AI data centers on land surface temperature. Preprint arXiv:2603.20897 (non sottoposto a revisione paritaria al novembre 2026).

[5] Amenaza Roboto / Pulitzer Center (2026, 22 aprile). Data Centers: The Heat Behind the Cloud — contro-analisi Landsat sul caso Uruguay (32.861 osservazioni, 25 anni).

[6] Masley, A. (2026, 31 marzo). Data centers' heat exhaust is not raising the land temperature. Contro-analisi fisica indipendente.

[7] Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108, 1–24.

[8] Briggs, G. A. (1975). Plume rise predictions. In Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses. American Meteorological Society.

[9] Hanna, S. R., Briggs, G. A., Hosker, R. P. (1982). Handbook on Atmospheric Diffusion. DOE/TIC-11223.

[10] Pasquill, F. (1961). The estimation of the dispersion of windborne material. The Meteorological Magazine, 90, 33–49.

[11] Noovle S.p.A. Data Center (PUE inferiore a 1,3 dichiarato per i data center Tier IV). https://www.noovle.com/it/datacenter/

[12] Amazon (ottobre 2026). Amazon's approach to data centers: PUE globale 2025 pari a 1,14. https://www.aboutamazon.com/news/company-news/amazon-data-centers-built-together

SAGGIO SCIENTIFICO · PRIMA EDIZIONE · NOVEMBRE 2026

# Teoria del modello cumulativo del calore per i data center

*Derivazione dal metodo Cambridge e protocollo applicativo per la valutazione d'impatto termico*

a cura di Vincenzo Lepori

Prima edizione — novembre 2026

## NOTA INTRODUTTIVA

Questo volume, prima edizione, novembre 2026, espone la teoria del modello cumulativo del calore per i data center: tredici capitoli, le appendici A e B di riferimento e l'Appendice C con l'applicazione completa ai campus APTO e K2 Strategic nel Parco Agricolo Sud Milano. Le equazioni sono numerate in sequenza continua da (1) a (33).

Il saggio **approfondisce sia la teoria sia il caso applicativo**: il capitolo 4 integra la ricezione dello studio di Cambridge fino a novembre 2026 (compresa la critica dell'Uptime Institute e i nuovi dati del preprint); il capitolo 5 aggiorna la trattazione del PUE con le survey Uptime 2025–2026; il capitolo 6 aggiunge la prima letteratura sperimentale sul calore di scarico misurato in sito; il capitolo 11 rafforza il protocollo di misura con le caratteristiche operative di ECOSTRESS e con la novità decisiva del database europeo EED, che renderà pubblici i parametri oggi incerti; il capitolo 13 ricostruisce la cornice normativa 2026 — dalla direttiva EED alla legge regionale lombarda 11/2026, che per la prima volta cita esplicitamente l'effetto «isola di calore» tra gli oggetti di monitoraggio istituzionale. L'Appendice C è aggiornata allo stato procedurale di novembre 2026: parere tecnico del MASE, scadenza dei termini per le osservazioni, estensione del progetto K2 anche al comune di Lacchiarella, nascita della Rete Stop Data Center e i primi progetti italiani di recupero del calore (A2A–Equinix a Settimo Milanese, Retelit–A2A–DBA in Municipio 6, A2A–Qarnot a Brescia), che trasformano la raccomandazione sul teleriscaldamento da proposta a precedente industriale.

Questo è un documento a scopo divulgativo e di supporto al dibattito pubblico. Il modello è applicabile a qualunque campus di data center; i parametri di letteratura vanno sostituiti con la baseline diel sito.

# Indice

1 · Introduzione: perimetro del saggio e guida alla lettura.....5
1.1 Struttura del volume.....5
1.2 Tre regole metodologiche.....6
2 · L'atmosfera: struttura verticale e strato limite planetario.....7
2.1 La scala di altezza dell'atmosfera.....7
2.2 Il gradiente adiabatico secco e la stabilità.....7
2.3 Lo strato limite planetario.....8
3 · Il bilancio energetico di superficie.....10
3.1 Radiazione netta.....10
3.2 La partizione dell'energia: calore sensibile, latente, suolo.....10
3.3 Il flusso di calore sensibile e la conduttanza aerodinamica.....11
3.4 Evapotraspirazione di riferimento e deficit di saturazione.....12
3.5 Il termine urbano: calore antropico e accumulo.....13
3.6 Un controllo indipendente: la stima di Masley e la coerenza con l'equazione (11)13
4 · Il metodo Cambridge: costruzione, risultati e analisi critica.....15
4.1 Disegno dello studio.....15
4.2 La curva dose-risposta.....15
4.3 I cinque problemi di attribuzione.....16
4.4 Otto mesi dopo: la ricezione dello studio (marzo–novembre 2026).....16
5 · Il modello cumulativo del calore.....18
5.1 Il principio di decomposizione.....18
5.2 Componente A: la perturbazione di flusso della superficie.....18
5.3 Componente B: dal megawatt elettrico al megawatt termico — e il PUE nel 202618
5.4 Il recupero del calore: la componente B come variabile di progetto.....19
5.5 Sovrapposizione di più impianti.....19
6 · La dispersione atmosferica del calore: turbolenza e pennacchio.....21
6.1 Stabilità e turbolenza: la lunghezza di Monin–Obukhov.....21
6.2 Il pennacchio gaussiano con riflessione al suolo.....21
6.3 L'innalzamento per galleggiamento.....22
6.4 La frazione di calore che torna al suolo.....23
6.5 La formula di screening per la componente B.....23
6.6 La prima verifica sperimentale: le misure di Phoenix (maggio 2026).....23
7 · Incertezza: propagazione e soglia di rilevabilità.....25
7.1 Propagazione in quadratura.....25
7.2 La soglia di rilevabilità.....25
8 · I parametri di superficie: albedo, rugosità, umidità.....26
8.1 Albedo.....26
8.2 Rugosità e umidità del suolo.....26
9 · Esempio numerico completo: il campus di riferimento da 300 MW.....27
10 · Confronto tra le previsioni: modello cumulativo e curva Cambridge.....29
11 · Protocollo di misura, verifica e falsificazione.....30
11.1 ECOSTRESS: la risoluzione che serve alla componente A.....30
11.2 Il database europeo: i parametri del modello diventano pubblici.....30

12 · Limiti, sviluppi futuri e conclusioni.....32
12.1 Limiti dichiarati.....32
12.2 Sviluppi.....32
12.3 Conclusioni.....32
13 · La cornice normativa 2026: dal modello fisico allo strumento autorizzativo. 33
13.1 Il livello europeo: la direttiva EED e il Regolamento 2024/1364.....33
13.2 Il livello nazionale: il procedimento unico del D.L. 21/2026 e la disciplina Asset33
13.3 Il livello regionale: la L.R. Lombardia 11/2026 e l'isola di calore.....33
13.4 Il recupero del calore: da raccomandazione a precedente industriale.....34
Appendice A · Costanti e parametri di letteratura.....35
Appendice B · Algoritmo di calcolo completo.....36
Appendice C · Applicazione del modello: l'isola di calore dei data center nel Parco Agricolo Sud Milano (campus APTO e K2 Strategic).....37
C.1 Perché un modello nuovo: le sei lacune del metodo Cambridge.....37
C.2 I due progetti e il quadrante.....37
C.3 Applicazione del metodo Cambridge al sito di studio.....38
C.4 Il modello cumulativo applicato: struttura del calcolo.....41
C.5 Risultati per il campus APTO.....42
C.6 Criticità per recettore: popolazione, sorgenti idriche, flora, fauna, agricoltura.....44
C.7 Cambiamento climatico e interazione con il calore dei campus.....45
C.8 Limiti e raccomandazione operativa.....46
C.9 Scenario cumulativo con l'ipotesi K2 Strategic (e il terzo polo).....46
C.10 Integrazione dei tre approcci e ruolo decisionale.....48
C.11 Nota di aggiornamento: lo stato procedurale a novembre 2026.....49
Bibliografia.....51

# 1 · Introduzione: perimetro del saggio e guida alla lettura

Nel marzo 2026 uno studio coordinato dall'Università di Cambridge[1] ha portato all'attenzione globale un fenomeno fino ad allora trascurato: i data center sono associati a un incremento medio della temperatura superficiale del suolo (Land Surface Temperature, LST) di **+2,07 °C** dopo l'avvio delle operazioni, rilevabile fino a 10 km di distanza [1]. La notizia ha avuto vasta eco mediatica [14] e ha sollevato interrogativi legittimi nei territori che ospitano, o ospiteranno, grandi campus di calcolo. Ma lo stesso studio, esaminato con gli strumenti della fisica dell'atmosfera, presenta un problema di attribuzione: il segnale misurato somma l'effetto dell'edificio (suolo sigillato, albedo modificata, evapotraspirazione perduta) e l'effetto dell'esercizio (il calore dissipato dai server), senza separarli. La contro-analisi indipendente ad alta risoluzione condotta sul caso Uruguay [13] attribuisce l'**83% del segnale** al cambio di copertura del suolo e solo il **17%** all'operatività; il bilancio fisico della dispersione indica che il calore di scarico spiega una quota dell'ordine dell'**1–3%** del segnale aggregato [2]. A novembre 2026 lo studio resta un preprint non sottoposto a revisione paritaria: la nuova sezione 4.4 ricostruisce la sua ricezione scientifica e mediatica nei primi otto mesi.

Questo saggio nasce da una domanda precisa: che cosa ci si deve attendere, fisicamente, dal punto di vista termico, quando si installa un campus di data center? La risposta richiede un modello che costruisca il campo termico dalle sorgenti fisiche separate — il calore legato all'impianto edilizio e il calore legato all'attività di calcolo — e le sommi cumulativamente, con parametri espliciti, incertezze dichiarate e criteri di falsificazione. Questo è il **modello cumulativo del calore**: un modello derivato come correzione strutturale del metodo Cambridge, fondato sul bilancio energetico di superficie e sulla teoria della dispersione turbolenta in atmosfera.

## 1.1 Struttura del volume

Il volume è organizzato in due parti. La parte teorica (capitoli 1–13) sviluppa il modello dalle fondamenta fisiche: la struttura dell'atmosfera e dello strato limite (capitolo 2), il bilancio energetico di superficie (capitolo 3), la ricostruzione e la critica del metodo Cambridge con la rassegna della sua ricezione (capitolo 4), la decomposizione cumulativa in componente A (impianto) e componente B (attività) (capitolo 5), la teoria della dispersione del pennacchio di calore (capitolo 6), il trattamento dell'incertezza (capitolo 7), i parametri di superficie (capitolo 8), un esempio numerico completo su un campus di riferimento da 300 MW (capitolo 9), il confronto quantitativo con la curva Cambridge (capitolo 10), il protocollo di misura e falsificazione (capitolo 11), i limiti con gli sviluppi futuri (capitolo 12) e la cornice normativa europea, nazionale e regionale del 2026 che rende il modello direttamente operativo nelle procedure autorizzative (capitolo 13). Le equazioni sono numerate progressivamente da (1) a (33); le appendici A e B raccolgono le costanti di letteratura e l'algoritmo di calcolo completo.

L'Appendice C contiene l'applicazione integrale del modello a un caso reale: i campus APTO (300 MVA, Lacchiarella) e K2 Strategic (fino a 400 MW, Zibido San Giacomo e Lacchiarella) nel Parco Agricolo Sud Milano, qui riprodotto in forma aggiornata al novembre 2026: tutti i passaggi quantitativi

[1]Marinoni, A., et al. (2026). The data heat island effect: quantifying the impact of AI data centers on land surface temperature, arXiv:2603.20897, marzo 2026 [1]. Preprint: al novembre 2026 non risulta pubblicata una versione sottoposta a revisione paritaria.

sono stati ricalcolati con le equazioni della parte teorica (in particolare i capitoli 3, 5 e 6) e con i parametri di Appendice A, lo stato procedurale è aggiornato alla scadenza dei termini per le osservazioni pubbliche (1° ottobre 2026) e i riferimenti incrociati puntano ai capitoli corrispondenti. L'appendice svolge il ruolo che le compete: non è la fonte della teoria, ma la sua verifica applicativa, il banco di prova su cui le formule derivate nei capitoli 5 e 6 producono numeri confrontabili con le misure future.

## 1.2 Tre regole metodologiche

Tre regole attraversano tutto il saggio. **Prima**: ogni grandezza ha un'unità e ogni formula è dimensionalmente omogenea; dove appare un coefficiente numerico, ne è dichiarata la fonte (letteratura o calcolo). **Seconda**: le stime sono date come intervalli, mai come valori puntuali privi di incertezza; la propagazione segue la somma in quadratura (equazione 31). **Terza**: il modello si impegna su previsioni falsificabili perché, valori e soglie misurabili con la rete di monitoraggio descritta nel capitolo 11, come mostra l'analisi dello studio di Cambridge, una curva che spiega tutto non prevede nulla. A queste tre regole se ne aggiunge una quarta, imposta dalla cornice normativa maturata nel 2026: ogni previsione deve poter dialogare con gli indicatori che la legge rende pubblici (PUE, WUE, ERF, REF del Regolamento delegato (UE) 2024/1364) perché un modello che non si misura con i dati che gli operatori sono obbligati a pubblicare resta un esercizio accademico (capitolo 13).

# 2 · L'atmosfera: struttura verticale e strato limite planetario

Il calore disperso da un data center entra nel fluido atmosferico, e il suo destino dipende dalla struttura verticale di quel fluido. Questo capitolo raccoglie gli elementi di termodinamica dell'aria necessari ai capitoli successivi: la scala di altezza, la struttura a strati dell'atmosfera, il gradiente adiabatico secco e la nozione di stabilità, la temperatura virtuale, e infine lo strato limite planetario (PBL) che è la «scatola» entro cui avviene la dispersione del calore diurno.

## 2.1 La scala di altezza dell'atmosfera

Dall'equilibrio idrostatico $dp/dz = -\rho g$ e dall'equazione di stato dei gas perfetti $p = \rho R^* T$ (con $R^* = 287\ \mathrm{J\ kg^{-1}\ K^{-1}}$ costante dell'aria secca) si ottiene, per un'atmosfera isoterma, il profilo esponenziale di pressione $p(z) = p^0\, e^{-z/H_s}$, dove la scala di altezza è

$$H_s = \frac{R^* T}{g} = \frac{287 \times 288}{9{,}81} \approx 8{,}4\ km \tag{1}$$

Il significato fisico è immediato: la massa dell'atmosfera è concentrata in uno strato sottile — metà della massa sta sotto ~5,6 km — e i processi che interessano l'impatto termico di un impianto a terra si svolgono interamente nel primo chilometro e mezzo, una frazione minuscola della colonna. La radiazione solare che riscalda la superficie attraversa questa colonna con un'attenuazione descritta, in prima approssimazione, dalla legge di Lambert–Beer:

$$S(z) = S_0 e^{-\tau \sec \theta z} \tag{2}$$

dove $\tau$ è lo spessore ottico atmosferico, $\theta z$ l'angolo zenitale solare e $S_0 \approx 1361\ \mathrm{W/m^2}$ la costante solare[2]. Il flusso che conta per il bilancio di superficie è quello che sopravvive a questa attenuazione, modulato da nubi e aerosol.

## 2.2 Il gradiente adiabatico secco e la stabilità

Una particella d'aria che si solleva si espande e si raffredda senza scambiare calore con l'ambiente. Dal primo principio della termodinamica per trasformazioni adiabatiche, $c_m dT = v dp$, combinato con l'equilibrio idrostatico $dp = -\rho g dz$ e $v = 1/\rho$, si ricava il gradiente adiabatico secco:

$$\Gamma_d = -(dT/dz)_{ad} = \frac{g}{c_p} = \frac{9{,}81}{1005} \approx 9{,}8\ K/km \tag{3}$$

Il confronto tra il gradiente ambientale effettivo $\Gamma e = -dT/dz$ e $\Gamma d$ decide la stabilità: se $\Gamma e < \Gamma d$ una particella sollevata è più fredda dell'ambiente e ricade (atmosfera stabile, la turbolenza è soppressa); se $\Gamma e > \Gamma d$ la particella è più calda e accelera verso l'alto (atmosfera instabile, la convezione mescola tutto lo strato); il caso $\Gamma e = \Gamma d$ è neutro. Questa singola disuguaglianza governa l'intera fenomenologia del capitolo 6: di giorno, con il suolo surriscaldato, lo strato limite è instabile e diluisce il calore su una profondità di 1–1,5 km; di notte serena, l'inversione al suolo intrappola il raffreddamento in pochi ettometri e concentra qualunque flusso di calore residuo (figura 3). Quando il vapore acqueo condensa, il rilascio di calore latente riduce il gradiente a quello umido $\Gamma m \approx 4$–7 K/km, intermedio e variabile con temperatura e umidità [16, 17].

---

[2]Valore della costante solare secondo Kopp & Lean (2011) [25]: 1361 W/m².

Per la galleggiabilità dell'aria umida conta la temperatura virtuale, la temperatura che l'aria secca dovrebbe avere per eguagliare la densità dell'aria umida alla stessa pressione:

$$T_v \approx T\,(1 + 0{,}61\,q) \tag{4}$$

con q rapporto di mescolanza in kg/kg. Poiché l'aria umida è più leggera, le serate estive afose della Pianura Padana, con q fino a 0,012–0,015, hanno una T*v* superiore di 2–3 °C alla T misurata: un dettaglio che conta nella stima dell'innalzamento del pennacchio (equazioni 27–28), perché la spinta di galleggiamento dipende dal contrasto di T*v*, non di T.

## 2.3 Lo strato limite planetario

Lo strato limite planetario (PBL) è la porzione di troposfera direttamente influenzata dalla superficie, con un ciclo diurno marcato (figura 2). Di giorno la turbolenza convettiva lo porta a 1–1,5 km (picchi estivi anche 2 km); al tramonto collassa a 100–300 m con uno strato stabile al suolo; nei primi ~75 m (strato superficiale) i flussi turbolenti sono circa costanti con la quota e valgono i profili logaritmici trattati nel capitolo 3 [11, 18]. Due conseguenze decisive per il nostro problema: (i) il volume di diluizione del calore varia di un fattore ~10 tra mezzogiorno e notte, quindi lo stesso flusso di calore produce anomalie di temperatura molto diverse secondo l'ora; (ii) un pennacchio di calore che si innalza oltre la cima dello strato stabile notturno è di fatto disaccoppiato dal suolo fino al mattino è il meccanismo che, nel capitolo 6, riduce la frazione al suolo fg a valori trascurabili nelle ore convettive e la rende invece rilevante nelle notti serene.

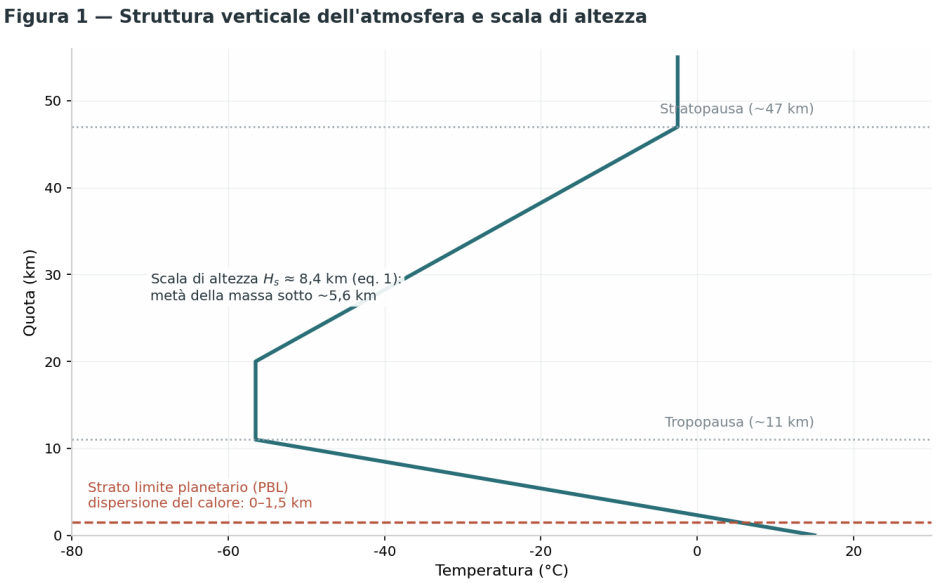



Figura 1 — Struttura verticale dell'atmosfera: profilo termico standard, strato limite planetario e scala di altezza $H_s$ (eq. 1).

Figura 2 — Ciclo diurno dello strato limite in estate: il volume di diluizione del calore varia di un ordine di grandezza tra giorno e notte.

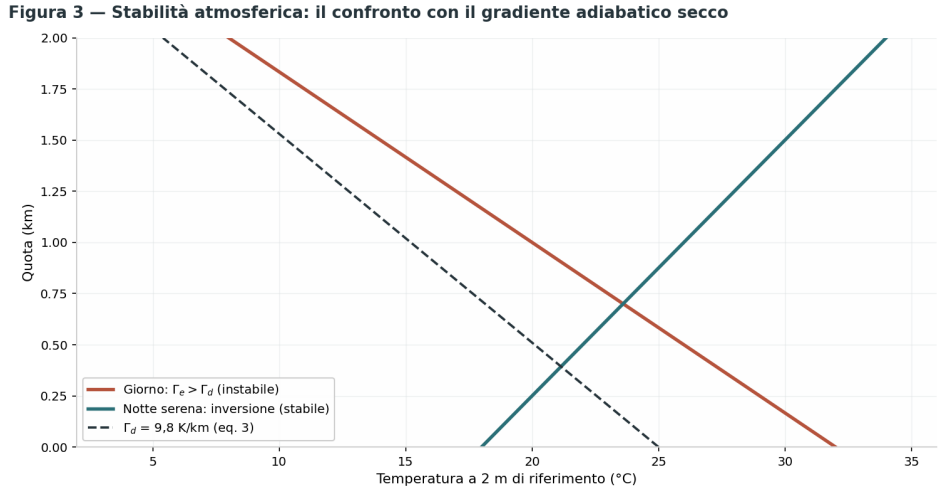



Figura 3 — Stabilità atmosferica: confronto tra gradiente ambientale e gradiente adiabatico secco Γd (eq. 3), di giorno e di notte.

# 3 · Il bilancio energetico di superficie

La temperatura di una superficie — un campo di mais, un tetto di capannone, un piazzale di asfalto — è fissata dall'equilibrio istantaneo tra i flussi di energia che la attraversano. Questo capitolo costruisce il bilancio termini a termini e ne ricava la prima delle due colonne del modello cumulativo: la componente A, il riscaldamento dovuto alla trasformazione del suolo.

## 3.1 Radiazione netta

La radiazione netta alla superficie è la somma algebrica di quattro flussi radiativi:

$$R_n = (1 - \alpha)\, S\downarrow + \varepsilon\,(L\downarrow - \sigma T_s^{\,4}) \tag{5}$$

dove α è l'albedo (frazione di radiazione solare riflessa), S↓ la radiazione solare globale, L↓ la radiazione infrarossa atmosferica, ε l'emissività della superficie e $\sigma = 5{,}670\times10^{-8}$ W m$^{-2}$ K$^{-4}$ la costante di Stefan–Boltzmann[3]. Il termine (1 − α)S↓ è il solo a dipendere fortemente dal tipo di superficie: sostituire un seminativo irriguo (α ≈ 0,20) con tetti scuri e asfalto (α ≈ 0,10–0,15) aumenta l'energia assorbita di ~70–80 W/m² a mezzogiorno estivo; ricoprire i tetti con membrane bianche (α ≈ 0,65) la riduce altrettanto sotto il valore agricolo. L'albedo è la leva progettuale più potente della componente A (capitolo 8, tabella 1).

## 3.2 La partizione dell'energia: calore sensibile, latente, suolo

L'energia netta si ripartisce in flusso di calore sensibile H (quello che riscalda l'aria), flusso di calore latente LE (evapotraspirazione), e flusso nel suolo G:

$$R_n = H + \leq + G \tag{6}$$

La partizione è descritta dal rapporto di Bowen β = H/LE [3, 4]:

$$\beta = \frac{H}{\mathrm{LE}} \Longrightarrow \quad H = \frac{\beta}{1+\beta}(R_n - G), \quad \leq = \frac{1}{1+\beta}(R_n - G) \tag{7}$$

Un seminativo irriguo estivo ha β ≈ 0,4–0,8: la maggior parte dell'energia se ne va in vapore acqueo e la superficie resta fresca. Una superficie sigillata e asciutta ha β ≈ 4–10: quasi tutta l'energia diventa calore sensibile (figura 5). È questo scambio di partizione, più ancora dell'albedo, il motore termico della componente A: il campus non «produce» il calore edilizio, *smette di consumarlo in evaporazione*. La quantificazione remota di questa partizione è oggi routine operativa con i modelli a bilancio energetico da telerilevamento SEBAL e METRIC[4] [7, 8, 9].

Nelle ore notturne il bilancio cambia segno: R*n* < 0 (la superficie perde energia infrarossa verso il cielo) e i tetti radiativamente esposti si raffreddano più dei campi, salvo cedere poi più calore per inerzia termica. L'effetto netto medio annuo diurno resta positivo (+3–6 °C di LST sul footprint per transizioni seminativo→costruito in pianura [30]), ed è quello che entra nella componente A.

---

[3]In alcune dispense divulgative diffuse in rete (ad es. [16]) compare un refuso nel valore della costante di Stefan–Boltzmann; il valore corretto CODATA è $5{,}670\times10^{-8}$ W m$^{-2}$ K$^{-4}$.

[4]SEBAL [8] e METRIC [7] ricostruiscono Rn, H e LE pixel per pixel da immagini Landsat, ancorando la stima dell'evapotraspirazione; SUEWS [9] modellizza il bilancio urbano completo.

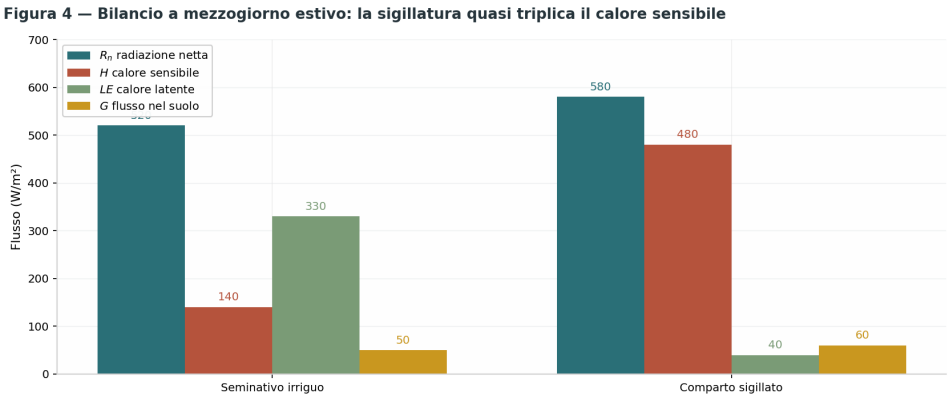



Figura 4 — Bilancio energetico a mezzogiorno estivo: seminativo irriguo contro comparto sigillato. Il flusso di calore sensibile H quasi triplica.

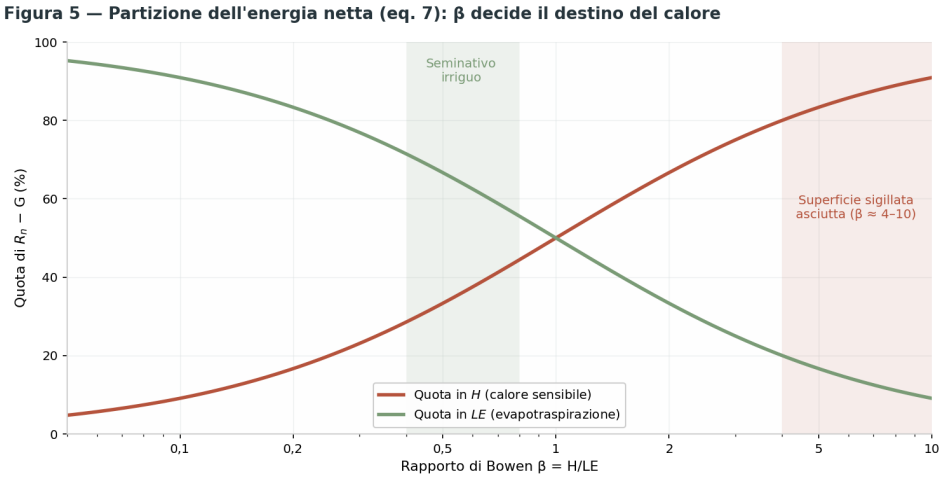



Figura 5 — Partizione dell'energia netta in funzione del rapporto di Bowen β (eq. 7): le bande indicano i regimi tipici di superficie.

## 3.3 Il flusso di calore sensibile e la conduttanza aerodinamica

Il flusso di calore sensibile dalla superficie all'aria obbedisce a una legge di Ohm termica:

$$H = \rho c_p g_a (T_s - T_a) \tag{8}$$

con ρ densità dell'aria, $c_p \approx 1005$ J kg⁻¹ K⁻¹, e $g_a$ conduttanza aerodinamica (m/s), che misura quanto efficacemente la turbolenza porta via il calore. Nello strato superficiale il vento ha profilo logaritmico [11, 18]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \tag{9}$$

con u* velocità d'attrito, κ ≈ 0,40 costante di von Kármán[5] e $z_0$ lunghezza di rugosità. Combinando i profili logaritmici di vento e temperatura si ottiene la conduttanza:

$$g_a = \frac{\kappa^2 u}{\ln(z/z_0)\ \ln(z/z_{0h})} \tag{10}$$

[5]La costante di von Kármán è nota sperimentalmente nell'intervallo 0,35–0,40; si adotta 0,40 secondo la convenzione di Stull [11].

con $z_{0h} \approx z_0/10$ rugosità termica. Numericamente: per u = 2 m/s a 10 m su un comparto costruito ($z_0$ = 0,5 m), $g_a \approx$ 0,025 m/s; la conduttanza efficace di scambio superficie–aria risulta $g_W = \rho c_p g_a \approx$ **12 –24 W m⁻² K⁻¹** a seconda di vento e rugosità. Questo numero è la «resistenza di contatto» tra il suolo e l'atmosfera, e dà il primo strumento previsionale del modello: una perturbazione di flusso ΔF sul footprint produce un incremento di temperatura superficiale

$$\Delta T_s = \frac{\Delta F}{g_W} \approx \frac{\Delta F}{12-24\ W\ m^{-2}\ K^{-1}} \tag{11}$$

Con ΔF ≈ +100 W/m² tipici della transizione seminativo→tetti/asfalto a mezzogiorno estivo, l'equazione (11) dà $\Delta T_s \approx$ +4–8 °C, in pieno accordo con i +5–12 °C diurni estivi misurati nelle transizioni osservate in Pianura Padana [30]: la componente A è quindi ancorata sia alla teoria sia all'osservazione.

Figura 6 — Profilo logaritmico del vento (eq. 9) la rugosità urbana rallenta il flusso al suolo

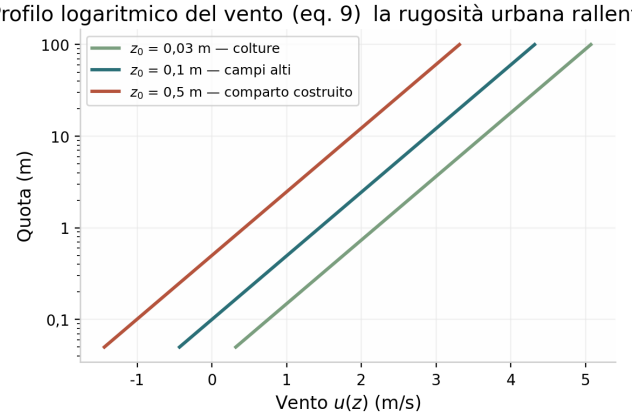



Figura 6 — Profilo logaritmico del vento (eq. 9) per tre lunghezze di rugosità: la rugosità urbana rallenta il vento al suolo ma aumenta la turbolenza meccanica.

## 3.4 Evapotraspirazione di riferimento e deficit di saturazione

Per quantificare il calore latente che il campus sottrae al territorio serve il riferimento agronomico standard: l'equazione di Penman–Monteith FAO-56 [19, 22]

$$LE_0 = \frac{\Delta\ (R_n - G) + \rho c_p VPD\, g_a}{\Delta + \gamma\ (1 + g_a/g_s)} \tag{12}$$

con Δ pendenza della curva di pressione di vapore saturo, γ costante psicrometrica, $g_s$ conduttanza stomatica di riferimento. La pendenza Δ deriva dalla formula di Tetens:

$$e_s(T) = 0{,}6108\ \exp\frac{17{,}27\ T}{T + 237{,}3}\,kPa, \quad VPD = e_s(T_a) - e_a \tag{13}$$

La crescita è quasi esponenziale, ~7%/°C a 20 °C (figura 7): è la stessa fisica di Clausius–Clapeyron che governa l'aumento di intensità delle precipitazioni estreme, ed è il motivo per cui la domanda evaporativa del territorio cresce rapidamente con il riscaldamento è il feedback acqua–calore discusso nell'Appendice C (§C.7). Una stima semplificata, utile per verifiche rapide, è la formula di Priestley–Taylor, che elimina il termine aerodinamico:

$$LE_{PT} = \alpha_{PT}\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R_n - G), \alpha_{PT} \approx 1{,}26 \tag{14}$$

Per un seminativo irriguo estivo con R$n$ − G ≈ 500 W/m², l'eq. (14) dà LE ≈ 400 W/m²; azzerandola, tutta questa potenza confluisce in H: è la quantificazione del «raffrescamento perduto» del suolo agricolo sigillato, cioè il cuore della componente A del capitolo 5.

## 3.5 Il termine urbano: calore antropico e accumulo

Nei bilanci urbani l'equazione (6) va estesa con il flusso di calore antropico Q$F$ e con l'accumulo termico nel volume costruito ΔQ$S$ [3, 4, 9]:

$$R_n + Q_F = H + \leq + G + \Delta Q_S \qquad (15)$$

Per un data center Q$F$ non è un dettaglio: con 375 MWth dispersi su 228.000 m² (campus APTO, Appendice C) il flusso antropico medio sul footprint è **~1.650 W/m²**, quattro volte la radiazione solare estiva media diurna. Ma, a differenza dell'isola di calore urbana classica dove Q$F$ è rilasciato al suolo, nel data center la quasi totalità è rilasciata a quota di tetto (15–30 m) da torri di raffreddamento e chiller: è questa separazione verticale che rende la componente B un problema di dispersione in atmosfera (capitolo 6) e non un semplice termine addizionale di superficie.

## 3.6 Un controllo indipendente: la stima di Masley e la coerenza con l'equazione (11)

La contro-analisi fisica di Masley [2], pubblicata il 31 marzo 2026 come immediata risposta al preprint di Cambridge, merita un posto nella teoria perché fornisce un'ancora indipendente alla conduttanza appena derivata. Masley ragiona sul caso estremo di un impianto da 100 MW il cui intero calore di scarico raggiungesse — per assurdo — il suolo entro un raggio di 1,6 km: la potenza media risultante sarebbe ~12,5 W/m². Con un coefficiente di scambio superficie–aria di **10–15 W m⁻² K⁻¹**, quel flusso sosterrebbe un incremento di appena ~0,8–1,2 °C anche nell'ipotesi fisicamente impossibile di deposizione totale al suolo; con la frazione realistica del 2–5% depositata entro quel raggio, l'effetto scende a **0,02–0,05 °C**, cioè l'1–3% del segnale di 1,5 °C che il preprint attribuisce a quella scala[6].

Il punto metodologicamente rilevante è che il coefficiente adottato da Masley — ricavato da regole empiriche dell'ingegneria del calore per superfici esterne con vento leggero — coincide, entro la sovrapposizione degli intervalli, con la conduttanza g$W$ = 12–24 W m⁻² K⁻¹ ricavata qui dalla teoria dello strato superficiale (eq. 8–7). Due catene indipendenti, una ingegneristica e una micrometeorologica, convergono sullo stesso numero: è la conferma che l'equazione (11) non è una scelta modellistica fragile ma un vincolo fisico robusto. La stessa convergenza si ritroverà nel capitolo 9, dove la stima della componente B a 1 km cade esattamente nell'intervallo 1–3% del segnale Cambridge calcolato da Masley con un metodo del tutto diverso.

[6]Masley [2] assume il caso-limite di deposizione totale entro 1,6 km (fisicamente impossibile: è un upper bound) e un coefficiente di scambio di 10–15 W m⁻² K⁻¹ da correlazioni per superfici esterne con vento leggero.

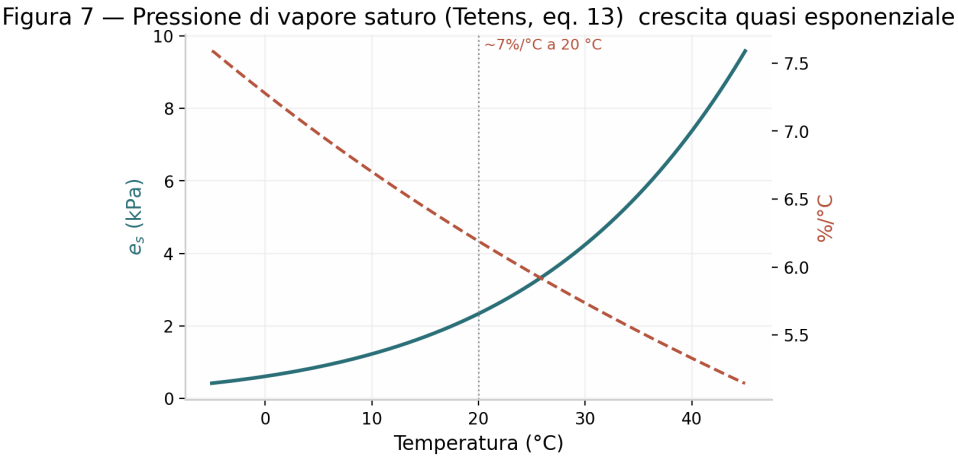



Figura 7 — Pressione di vapore saturo secondo Tetens (eq. 13) e sua sensibilità relativa: ~7%/°C a 20 °C.

# 4 · Il metodo Cambridge: costruzione, risultati e analisi critica

Lo studio di Marinoni et al. [1], il lavoro da cui questo saggio deriva per correzione, merita una ricostruzione accurata prima della critica: solo capendo che cosa misura esattamente si può capire che cosa non misura. Questo capitolo espone il disegno (§4.1), la curva dose-risposta ricostruita (§4.2), i cinque problemi di attribuzione (§4.3) e la ricezione dello studio nei primi otto mesi dalla pubblicazione (§4.4).

## 4.1 Disegno dello studio

Lo studio adotta un disegno di tipo *event-study*: per ciascuno degli oltre 8.400 data center censiti (6.733 superano il controllo qualità) si confronta la serie temporale di LST satellitare (MODIS, 2004–2024, pixel nativo 1 km ricostruito a 500 m) prima e dopo l'avvio delle operazioni. La stima dell'effetto è un estimatore di tipo Difference-in-Differences semplificato:

$$\Delta T = \left(\bar{T}_{post} - \bar{T}_{pre}\right)^{trattato} - \left(\bar{T}_{post} - \bar{T}_{pre}\right)^{controllo} \tag{16}$$

dove il secondo termine, il confronto con celle di controllo, è nel preprint assente o molto debole: il «controfattuale» è in larga parte il passato dello stesso pixel. I risultati principali: incremento medio **+2,07 °C** (intervallo 0,3–9,1 °C; 95° percentile 1,5–2,4 °C), effetto rilevabile fino a 10 km, riduzione di appena il 30% a 7 km, un incremento di ~1 °C ancora misurabile a 4,5 km e una stima di **343 milioni di persone** residenti entro 10 km da un impianto [1]. La figura 8 schematizza l'estimatore.

## 4.2 La curva dose-risposta

Il preprint non pubblica una funzione analitica di decadimento; i tre dati pubblici (intensità piena in prossimità, −30% a 7 km, effetto nullo oltre 10 km) sono compatibili con una forma lineare a tratti:

$$\Delta T(d) = \Delta T_0 \cdot \max\left[0,\ 1 - 0{,}30\frac{d}{7\ km}\right] \tag{17}$$

La figura 9 confronta questa forma con due alternative plausibili (esponenziale, iperbolica) calibrate sugli stessi vincoli: le code lunghe della forma lineare, +1,2 °C ancora a 10 km nello scenario centrale, sono una proprietà della forma scelta, non un risultato misurato, perché oltre 5–7 km i dati aggregati non discriminano tra i modelli. È la prima avvertenza per chi trasferisca la curva a un caso locale.

Figura 8 — Estimatore Difference-in-Differences: l'effetto è il gradino al netto del trend

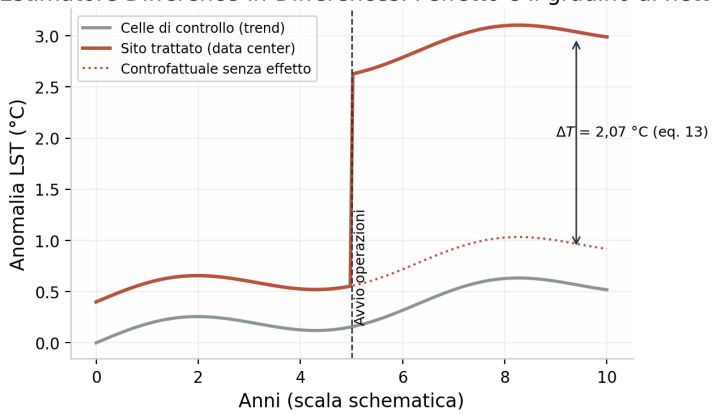



Figura 8 — Schema dell'estimatore DiD (eq. 16): l'effetto è il gradino del sito trattato al netto del trend dei controlli — il termine che il preprint Cambridge lascia assente o debole.

Figura 9 — Tre decadimenti compatibili con i dati pubblici Cambridge: divergono in coda

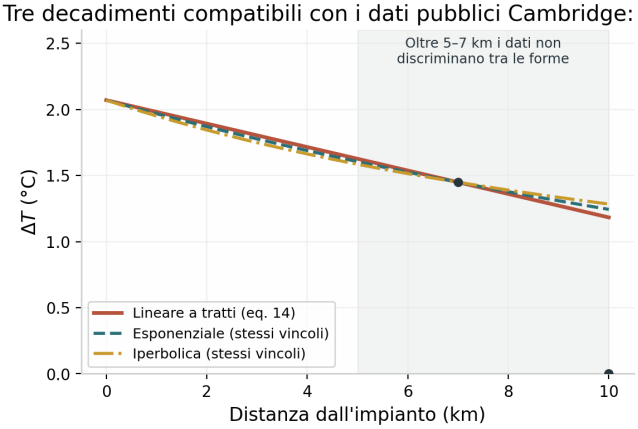



Figura 9 — Tre forme funzionali compatibili con i vincoli pubblici dello studio Cambridge: le differenze emergono proprio nella coda oltre 5 km.

## 4.3 I cinque problemi di attribuzione

L'analisi critica completa è svolta nell'Appendice C (§C.1); qui si riassumono i punti che motivano la costruzione del modello cumulativo. **(1) Peer review assente**: a novembre 2026 il preprint non ha completato la revisione paritaria. **(2) Confondente di copertura del suolo**: la sostituzione di vegetazione con edifici non è controllata (critiche di C. Preist, Università di Bristol, e R. Hintemann, Borderstep Institute [14]). **(3) Bilancio fisico**: la dispersione del solo calore di scarico spiega una quota dell'ordine dell'1–3% del segnale aggregato [2], la stima è riprodotta e precisata nei capitoli 6 e 9. **(4) Contro-analisi ad alta risoluzione**: sul caso Uruguay (Landsat, 32.861 osservazioni in 25 anni) l'83% del segnale è cambio di copertura del suolo e solo il 17% (+0,32 °C) è attribuibile all'operatività [13]. **(5) Composizione del campione**: gli impianti censiti sono in larga parte piccoli e precedenti al boom dell'AI; trasferirne la media a campus da 300–400 MW è un'estrapolazione con incertezza simmetrica.

## 4.4 Otto mesi dopo: la ricezione dello studio (marzo–novembre 2026)

A otto mesi dalla pubblicazione si può misurare che cosa il preprint è diventato nel dibattito pubblico. Quattro fatti contano. **Primo**: la traccia scientifica resta quella di un preprint. A novembre 2026 lo studio conta una dozzina di citazioni, quasi tutte di rimbalzo mediatico o in lavori di commento, e nessuna versione rivista è apparsa su rivista. **Secondo**: la stampa generalista ne ha amplificato la lettura massimalista [14] e la critica tecnica più circolata nel settore è quella dell'Uptime Institute Journal (agosto 2026) [34], che ha raccolto le perplessità degli operatori, nella città di Slough durante l'ondata di calore britannica di giugno 2026 come caso emblematico di percezione pubblica, ribadendo però che nessuna misura di campo aveva ancora verificato la componente operativa. **Terzo**: quella misura è arrivata da un'altra equipe, la campagna di Phoenix dell'Arizona State University [35] discussa nel capitolo 6, che ha trovato un segnale d'aria reale ma confinato a poche centinaia di metri, in piena coerenza con la componente B qui derivata e in aperta tensione con le code a 10 km della curva (14). **Quarto**: nelle procedure autorizzative italiane lo studio è entrato come argomento di parte ricorrente e nell'istruttoria VIA del quadrante sud-ovest milanese la commissione ministeriale richiede ormai esplicitamente bilanci cumulativi «per aria, acqua, rumore, suolo, calore e traffico» [46], cioè esattamente la scomposizione per matrice che il modello cumulativo formalizza. Il preprint, insomma, ha avuto ragione nel porre la questione e torto nel risolverla con un unico numero: il 2026 ha trasformato la sua eredità da risultato a programma di misura.

> *Conclusione del capitolo. Il gradino termico misurato dai satelliti è reale, ma la lettura causale «il calore dei server scalda l'ambiente fino a 10 km» non è supportata: la spiegazione parsimoniosa è che gli edifici sono più caldi dei campi. Le cifre aggregate dello studio vanno trattate come limite superiore precauzionale — il ruolo decisionale che l'Appendice C (§C.10) gli assegna esplicitamente — non come previsione.*

# 5 · Il modello cumulativo del calore

## 5.1 Il principio di decomposizione

Il modello cumulativo del calore risponde alle lacune del metodo Cambridge con un principio di scomposizione: l'anomalia termica prodotta da un data center è la somma cumulativa di due contributi fisicamente distinti, ciascuno con la propria legge di scala e la propria distanza caratteristica, più il trend climatico regionale (da rimuovere con siti di controllo) e un residuo:

$$\Delta T_{tot}(r,\ t) = \Delta T_A(r)_{impianto:\ suolo\ ed\ edifici} + \Delta T_B(r,\ t)_{attività:\ calore\ di\ esercizio} + \Delta T_{clima}(t)_{da\ rimuovere} + \varepsilon \tag{18}$$

Le due componenti non sono solo additive: hanno fisica diversa. La componente A è un'anomalia di bilancio radiativo della superficie (capitolo 3): permanente, diurna ed estiva nel suo massimo, confinata al footprint e al suo intorno immediato (scala di mescolamento 0,3–0,5 km), indipendente dal carico dei server. La componente B è un rilascio continuo di calore sensibile in quota: dipende dalla potenza elettrica, dalla stagione e dall'ora del giorno, e decade con le leggi della dispersione turbolenta (capitolo 6). Sommarle «in media annua», come fa implicitamente lo studio Cambridge, mescola grandezze con diversa dipendenza temporale e spaziale: di qui gli errori di attribuzione.

## 5.2 Componente A: la perturbazione di flusso della superficie

La trasformazione del suolo cambia albedo (Δα), evapotraspirazione (ΔLE), rugosità e inerzia termica. La perturbazione di flusso netta che ne consegue si scrive:

$$\Delta F_A = -S\downarrow\ \Delta\alpha\ -\ \Delta LE\ + \Delta G_{netto} \tag{19}$$

e si converte in temperatura con l'equazione (11). Per la transizione tipica (seminativo irriguo → tetti scuri + asfalto): Δα ≈ −0,08 su S↓ ≈ 700 W/m² diurni estivi dà +56 W/m²; la perdita di evapotraspirazione (eq. 14) dà +300–400 W/m² diurni; il bilancio netto integrato sul giorno e sull'anno, mediato con le osservazioni di transizioni analoghe [30], produce i **+3–6 °C di media annua diurna sul footprint** che il modello adotta come fascia centrale della componente A (figura C3 in Appendice C). La componente A decade con un kernel di mescolamento di scala comparabile alla dimensione del sito: ~+1,0 °C a 0,5 km, ~+0,3 °C a 1 km, <0,1 °C oltre 2 km.

## 5.3 Componente B: dal megawatt elettrico al megawatt termico — e il PUE nel 2026

Tutta l'energia elettrica assorbita da un data center diventa infine calore: il calore dissipato in esercizio è

$$Q_s = P_{IT} \times\ PUE \tag{20}$$

con P*IT* potenza informatica e PUE (Power Usage Effectiveness) il rapporto tra energia totale ed energia IT [24]. Il parametro decisivo va fissato sui dati più recenti. Le survey Uptime 2025–2026 [32, 33] danno oggi un quadro a due velocità: la **media semplice di settore è 1,52** (2026; 1,54 nel 2025, in stallo da sette anni per il peso del parco legacy), ma la **media pesata sulla capacità è 1,36** e i nuovi

hyperscaler riportano routinariamente **PUE ≤ 1,3**, con il 23% degli operatori sotto 1,3[7]. Per un campus di nuova costruzione nel 2026–2028 la fascia prudenziale corretta è quindi 1,25–1,40 (adottata nei calcoli dei capitoli 9 e C), con la consapevolezza che il valore effettivo sarà pubblico: il Regolamento (UE) 2024/1364 obbliga alla comunicazione annuale del PUE per sito (capitolo 13), e questa è la prima chiusura della principale incognita del modello — ogni 0,1 di PUE sposta la componente B dell'8%.

Per il campus di riferimento del capitolo 9 ($P_{IT}$ = 300 MW, PUE = 1,25): $Q_s$ = 375 MWth a pieno carico; con fattore di carico $f_s$ = 0,7 la media operativa è $Q_s \approx$ 260 MWth. La conversione di questo flusso in un campo di temperatura richiede la fisica del capitolo 6; qui conta il principio: **la componente B è proporzionale alla potenza elettrica, si spegne con l'impianto, e si innalza** — tre proprietà che la distinguono sperimentalmente dalla componente A.

## 5.4 Il recupero del calore: la componente B come variabile di progetto

Uno sviluppo decisivo, imposto dai fatti del 2025–2026: la componente B non è più trattabile come un flusso interamente disperso. Se una frazione $f_{rec}$ del calore è recuperata (teleriscaldamento, serre, processi industriali), il rilascio effettivo in atmosfera diventa:

$$Q_{eff} = Q_s(1 - f_{rec}) \tag{21}$$

con $f_{rec}$ limitato dall'utenza raggiungibile e dalla temperatura di rete (il calore dei server a raffreddamento ad aria esce a ~30 °C e richiede pompe di calore; quello a raffreddamento liquido arriva a 60–65 °C ed è direttamente utilizzabile). Il 2026 ha fornito i precedenti industriali italiani che trasformano l'equazione (21) da ipotesi a pratica: la partnership A2A–Equinix sul campus di Settimo Milanese, avviata a luglio 2026, valorizzerà a regime **~225 GWh/anno** di calore — il 20% in più per il teleriscaldamento milanese, il fabbisogno di oltre 21.000 abitazioni — attraverso un Energy Center con quattro pompe di calore da 72 MW complessivi[8] [42]; il progetto Retelit–A2A–DBA sull'Avalon 3 di Municipio 6, il primo del genere in Italia (2024), scalda 1.250 famiglie con 15 GWh/anno[9] [43]; e l'impianto A2A–Qarnot di Brescia (giugno 2025) dimostra la via del raffreddamento liquido, con calore recuperato a **65 °C** immesso direttamente in rete senza pompe di calore [44]. Tre conseguenze per il modello: (i) $f_{rec}$ entra nei calcoli della componente B come riduzione diretta di $Q_s$ prima della catena di dispersione (eq. 25–30); (ii) il recupero ha un valore ambientale doppio, perché sottrae calore all'atmosfera e gas alla rete termica; (iii) il Regolamento (UE) 2024/1364 misura esattamente questo con gli indicatori ERF (Energy Reuse Factor) e REF (Renewable Energy Factor): un campus con ERF alto dichiara pubblicamente una componente B ridotta — e la L.R. Lombardia 11/2026 e il dibattito autorizzativo 2026 trattano ormai il recupero come prescrizione attesa, non come optional (§C.3.5, §C.11).

---

[7]Uptime Institute Global Data Center Survey 2026 [32]: media annua di settore 1,52 (n = 644), in stallo da sette anni; media pesata sulla capacità 1,36 [33]; i nuovi hyperscaler riportano routinariamente PUE ≤ 1,3 e il 23% degli operatori dichiara medie sotto 1,3.

[8]Sailor, Samareh Abolhassani & Martin [35]: cinque traverse veicolari su quattro impianti (36–169 MW), giugno–ottobre 2025; ΔT dell'aria medio 0,7–0,9 °C, massimo 2,2 °C, segnale entro 100–500 m dal perimetro.

[9]ECOSTRESS (NASA/JPL), prodotto ECO_L2G_LSTE v002 [36]: LST a ~70 m dalla ISS, con ore locali di passaggio variabili che coprono anche la fascia notturna.

## 5.5 Sovrapposizione di più impianti

Per più campus vicini (la condizione, ormai comune, dei «poli» di data center) il modello si estende per sovrapposizione lineare dei campi delle singole sorgenti — giustificata dalla linearità dell'equazione di diffusione turbolenta a coefficienti dati:

$$\Delta T_{cum}(x) = \sum_{i}^{N} \left[ \Delta T_{A,i}(x - x_i) + \Delta T_{B,i}(x - x_i,\ t) \right] \tag{22}$$

La sovrapposizione lineare è conservativa per i massimi (trascura la saturazione dello strato limite) e adeguata alle distanze in gioco (≥1 km); la sua applicazione al caso APTO + K2 è in Appendice C, §C.9, con la figura C4. Il punto decisivo: anche sommando due campus da ~924 MWth complessivi, la componente B oltre 2 km resta sotto 0,1 °C (capitolo 9, tabella 2) non si forma un'isola di calore operativa regionale. Va però registrato che nel quadrante sud-ovest milanese le sorgenti nel 2026 non sono più due: l'istruttoria VIA dell'Amazon Edificio A di Zibido [46] conferma un terzo polo in procedura nel medesimo ambito, e la commissione richiede esplicitamente la modellazione multisorgente di Amazon, APTO e Rozzano negli stessi scenari meteorologici, l'equazione (22) diventa così, nel caso applicativo, una somma a tre termini (§C.9).

> *Perché «cumulativo». Il nome rivendica la correzione rispetto al metodo Cambridge: non esiste «il» ΔT di un data center; esistono due termini da stimare separatamente — con strumenti diversi (bilancio di superficie per A, dispersione per B) — e da sommare solo dopo aver rimosso il trend climatico con i controlli (eq. 16 applicata correttamente, capitolo 11). La somma è l'ultimo passo, non il primo.*

# 6 · La dispersione atmosferica del calore: turbolenza e pennacchio

La componente B si gioca in atmosfera. Questo capitolo costruisce la catena completa: dal flusso di calore al pennacchio convettivo, dall'innalzamento per galleggiamento alla diffusione turbolenta, fino alla frazione di calore che torna al suolo e alla temperatura anomala risultante. È il capitolo che chiude quantitativamente la questione aperta dallo studio Cambridge e che nel 2026 ha trovato la sua prima verifica sperimentale diretta (§6.6).

## 6.1 Stabilità e turbolenza: la lunghezza di Monin–Obukhov

Il criterio di stabilità del capitolo 2 (confronto tra $\Gamma e$ e $\Gamma d$) ha una forma continua e quantitativa nella teoria di similarità di Monin–Obukhov. La scala di lunghezza che separa il regime di turbolenza meccanica da quello di turbolenza convettiva è

$$L = -\frac{\rho c_p T u_*^3}{\kappa \; g \; H} \tag{23}$$

con H flusso di calore sensibile di superficie. L piccolo (poche decine di metri) indica stabilità intensa (notti serene); L negativo grande indica forte instabilità diurna; $|L| \to \infty$ è il regime neutro. Il rapporto adimensionale z/L governa le correzioni ai profili logaritmici delle equazioni (9)–(10). Un'alternativa locale, utile con i profili misurati, è il numero di Richardson di gradiente:

$$Ri_g = \frac{g \;\; \partial\theta/\partial z}{\theta \;\; (\partial u/\partial z)^2} \tag{24}$$

con θ temperatura potenziale. Nella pratica operativa la stabilità è classificata con le classi di Pasquill–Gifford (A: fortemente instabile … F: molto stabile) [21], ricavabili da vento, nuvolosità e radiazione: è la classificazione usata nei calcoli del capitolo 9 e dell'Appendice C.

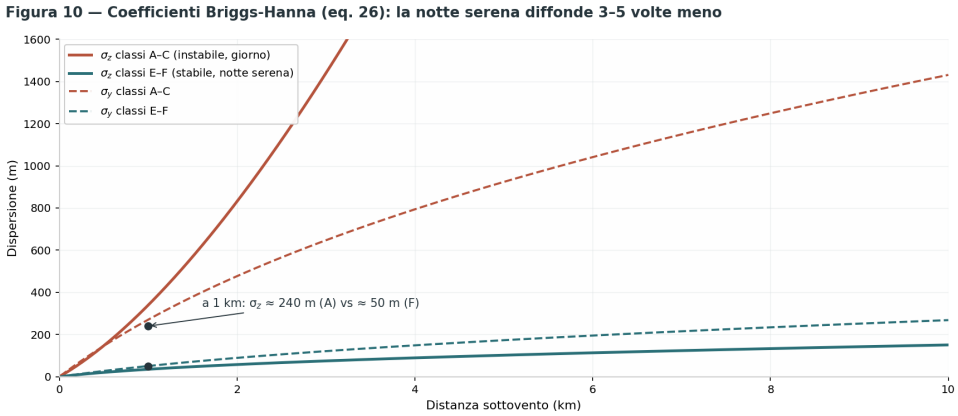



Figura 10 — Schema dei regimi di stabilità (classi Pasquill–Gifford) e dell'innalzamento di Briggs (eq. 28): la stessa sorgente produce destini opposti di giorno e di notte serena.

## 6.2 Il pennacchio gaussiano con riflessione al suolo

Per una sorgente continua a quota efficace H, in condizioni stazionarie e omogenee, la concentrazione (o l'eccesso di temperatura) sottovento è data dalla soluzione gaussiana dell'equazione di diffusione, con riflessione al suolo [20, 21]:

$$\Delta T(x,\ y,\ z) = \frac{Q_s}{2\pi\sigma_y\sigma_z u c_p \rho}\exp\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\left[\ \exp\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} + \exp\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (25)$$

Il secondo esponenziale è la «sorgente immagine»: il suolo non assorbe il calore, lo riflette. Le dispersioni σ*y* e σ*z* crescono con la distanza secondo le parametrizzazioni di Briggs per aree urbane [20]:

$$\sigma_y = \frac{0{,}32\ x}{(1\ +\ 0{,}0004\ x)^{1/2}},\ \sigma_z = 0{,}24\ x\ (1\ +\ 0{,}001\ x)^{1/2}(classe\ \ D) \quad (26)$$

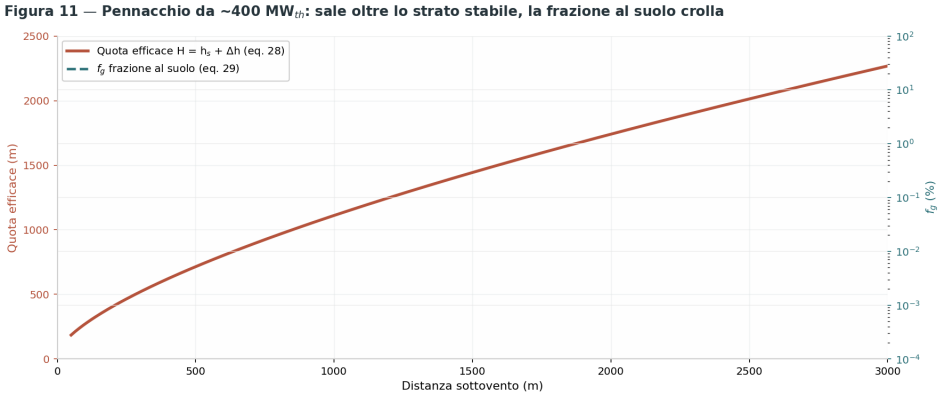



Figura 11 — Pennacchio gaussiano con riflessione al suolo (eq. 25): quota efficace H, dispersioni σy, σz e sorgente immagine.

Nelle classi più stabili (E–F) σ*z* cresce più lentamente e il pennacchio resta compatto; in quelle instabili (A–B) la diluizione è rapida. È l'asimmetria che rende la notte serena lo scenario critico per la componente B.

## 6.3 L'innalzamento per galleggiamento

Il calore è rilasciato a quota di tetto ma non vi resta: è un flusso di galleggiamento. Il parametro di galleggiamento è

$$F = \frac{g Q_s}{\pi\ \rho c_p T_a} \quad (27)$$

Per Q*s* = 260–375 MWth, T*a* = 288 K: F ≈ 2.400 $m^4/s^3$. Le formule di Briggs [10] danno l'innalzamento in funzione del regime di stabilità:

$$neutro/instabile:\ \ \Delta h = 1{,}6\ F^{1/3}u_{-1}x^{2/3};\quad stabile:\ \ \Delta h = 2{,}6\frac{F}{u\ S^{1/3}},\quad con\ \ S = \frac{g}{T_a}\partial\theta/\partial z \quad (28)$$

Con u = 2 m/s in classe D il pennacchio del campus di riferimento guadagna ~240 m nei primi 200 m di corsa e raggiunge ~1.300 m di innalzamento finale in regime neutro; in regime stabile moderato ($S = 5\times10^{-4}\ s^{-2}$) l'innalzamento si arresta a ~300 m comunque sopra la cima dello strato stabile notturno (100–300 m). Il calore, cioè, esce dalla «scatola» entro cui il suolo si raffredda di notte (figura 10).

## 6.4 La frazione di calore che torna al suolo

Dall'equazione (25), il rapporto tra il flusso che raggiunge il suolo e quello totale è, in forma ridotta, la frazione gaussiana:

$$f_g \approx \exp \frac{-H^2}{2\sigma_z^2} \tag{29}$$

La dipendenza esponenziale da H/σ*z* è il termine dominante dell'intera catena: raddoppiare la quota efficace non dimezza la frazione al suolo, la riduce di ordini di grandezza. È anche il termine che concentra l'incertezza (capitolo 7): una stima prudenziale con H = 60–150 m nelle notti di classe F dà fg = 1–5%.

## 6.5 La formula di screening per la componente B

Integrando l'equazione (25) sull'area del pennacchio e applicando la conduttanza aerodinamica (eq. 8 e 10) si ottiene la formula di screening del modello per l'eccesso di temperatura al suolo a distanza x:

$$\Delta T_B(x) \approx \frac{Q_s f_g(x)}{g_W \cdot \pi \sigma_y(x) \cdot 2} \tag{30}$$

Per il campus di riferimento, a 1 km, notte di classe F con u = 1,5 m/s (σ*y* ≈ 93 m, σ*z* ≈ 50 m): Δ*TB* = **+0,08 – 0,40 °C** (centrale +0,16). Di giorno, in classe D, il risultato crolla sotto $10^{-6}$ °C: trascurabile per definizione. La figura 12 mostra il campo completo.

Figura 12 — Pennacchio gaussiano con sorgente immagine (eq. 25) notte serena, classe F

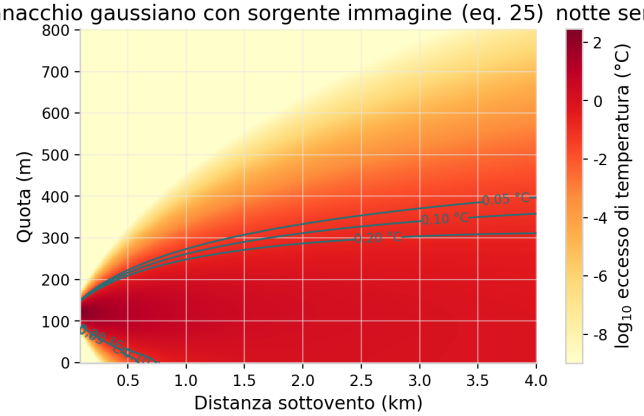



Figura 12 — Campo della componente B per il campus di riferimento: decadimento con la distanza nello scenario notturno critico (classe F) e confronto con lo scenario diurno (classe D).

## 6.6 La prima verifica sperimentale: le misure di Phoenix (maggio 2026)

Fino al 2025 la catena (20) e (25)–(30) poggiava interamente su teoria e parametrizzazioni di letteratura. Nel maggio 2026 l'Arizona State University ha pubblicato le **prime misure di campo della componente B**: traverse veicolari con sensori RTD (accuratezza 0,1 °C) a 1,6–2,2 m di quota, sopravento e sottovento rispetto a quattro data center dell'area di Phoenix da un impianto da 36 MW a un campus di colocation da 169 MW [35][10]. I risultati: riscaldamento dell'aria sottovento in media di **0,7**

[10]Direttiva (UE) 2023/1791, art. 12 e allegato VI [37]; Regolamento delegato (UE) 2024/1364 [38]: obbligo annuale di comunicazione per i data center oltre 500 kW, con alimentazione di un database europeo.

**–0,9 °C**, con punte di **2,2 °C**, segnale termico rilevabile tra **100 e 500 m** dal perimetro degli impianti, coerente con la direzione del vento in tutte le campagne, e nessun segnale oltre il mezzo chilometro.

Tre conferme dirette per il modello cumulativo. **(i) La scala spaziale**: il segnale dell'attività si esaurisce in poche centinaia di metri, esattamente come la catena pennacchio–frazione al suolo prevede (a 1 km la stima realistica del capitolo 9 è ~+0,15 °C, già sotto o ai margini della risoluzione strumentale dei sensori ASU). **(ii) Il meccanismo**: gli autori attribuiscono il segnale alla dispersione del pennacchio di calore dai condensatori a tetto, l'aria di scarico esce a 8–14 °C sopra l'ambiente e si diluisce scendendo, e notano che la sensibilità di ~1 °C per 100 W/m² attesa da un bilancio puramente superficiale «suggerirebbe riscaldamenti molto maggiori»: è la conferma empirica che la separazione verticale (rilascio in quota + innalzamento, eq. 27–28) è ciò che tiene piccola la componente B. **(iii) La mitigazione**: una delle traverse ha misurato raffrescamento relativo sottovento di un bacino irriguo, la componente A in negativo, a riprova che acqua e verde in comparto sono la prima leva progettuale (§8.2). Resta un'avvertenza: Phoenix misura l'*aria* a 2 m in clima arido e ventoso; il modello prevede la LST e l'aria in pianura padana. La verifica decisiva per il nostro caso resta il protocollo del capitolo 11 applicato al quadrante Lacchiarella–Zibido, dove però — a differenza di Phoenix — la Fase 1 può ancora precedere i cantieri.

# 7 · Incertezza: propagazione e soglia di rilevabilità

## 7.1 Propagazione in quadratura

Ogni stima del modello è una catena di parametri incerti: PUE, fattore di carico, classe di stabilità, vento, parametri di Briggs. Per errori indipendenti l'incertezza relativa si propaga in quadratura:

$$\sigma_{\Delta T} = \Delta T \cdot \sqrt{\sum_k \left( \frac{\partial \ln \Delta T}{\partial \ln p_k} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sigma_{p_k}}{p_k} \right)^2} \tag{31}$$

Le sensibilità si leggono direttamente dalle equazioni: $\Delta T_B \propto Q_s$ (eq. 30) dà esponente 1 su PUE e fattore di carico; $f_g$ dipende esponenzialmente da $H/\sigma_z$ (eq. 29) è il termine dominante dell'incertezza, ed è il motivo per cui i risultati sono presentati come fasce (es. +0,08–0,40 °C) e non come valori puntuali. L'incertezza complessiva tipica sulla componente B a 1 km è un fattore ~2,5–3; sulla componente A, ancorata a osservazioni dirette, è ~±40%.

## 7.2 La soglia di rilevabilità

Una previsione è utile solo se confrontabile con uno strumento. La variabilità naturale della LST su scala di pixel satellitari (500 m–1 km) è 1–3 °C; con serie lunghe e controlli appaiati (eq. 16) la soglia di rilevabilità pratica scende a

$$\Delta T_{min} \gtrsim \frac{\sigma_{LST}}{\sqrt{N}} \approx 0{,}05 - 0{,}1 \ °C \tag{32}$$

con N numero di osservazioni indipendenti della serie. Questa soglia, tracciata come linea orizzontale nella figura 14 e nelle figure C3–C4 dell'Appendice C, è il confine fisico della verifica: le previsioni del modello sotto 0,05–0,1 °C (componente B oltre 2 km) sono coerenti con «nessun effetto misurabile» e vanno dichiarate tali, non sommate artificialmente per produrre allarme. È la stessa soglia usata nei criteri di falsificazione dell'Appendice C (§C.10).

# 8 · I parametri di superficie: albedo, rugosità, umidità

Il modello è sensibile quanto i suoi parametri. Questo capitolo raccoglie gli intervalli di letteratura per le grandezze di superficie e discute la leva progettuale che offrono.

## 8.1 Albedo

La tabella 1 e la figura 13 raccolgono gli intervalli di albedo per le superfici coinvolte nella transizione agricolo → data center [3, 7, 23]. Due osservazioni operative. (i) La transizione standard (seminario, α ≈ 0,20 → tetti scuri e asfalto, α ≈ 0,10–0,15) aumenta l'energia assorbita: è la scelta impiantistica di default. (ii) Con tetti bianchi riflettenti (α ≈ 0,65) e pavimentazioni chiare si può invertire il segno del termine radiativo: **la componente A non è una fatalità ma una variabile di progetto** ed è la prima mitigazione da prescrivere in fase autorizzativa (Appendice C, §C.3.5).

Tabella 1 — Albedo di superfici tipiche (intervalli da [3, 7, 23])

| Superficie | Albedo tipico | Intervallo |
|---|---|---|
| Erba / seminativo irriguo | 0,21 | 0,18–0,23 |
| Bosco | 0,14 | 0,10–0,18 |
| Asfalto invecchiato | 0,10 | 0,08–0,15 |
| Calcestruzzo | 0,30 | 0,20–0,40 |
| Tetto a ghiaia scura | 0,12 | 0,08–0,15 |
| Tetto bianco riflettente | 0,65 | 0,55–0,75 |

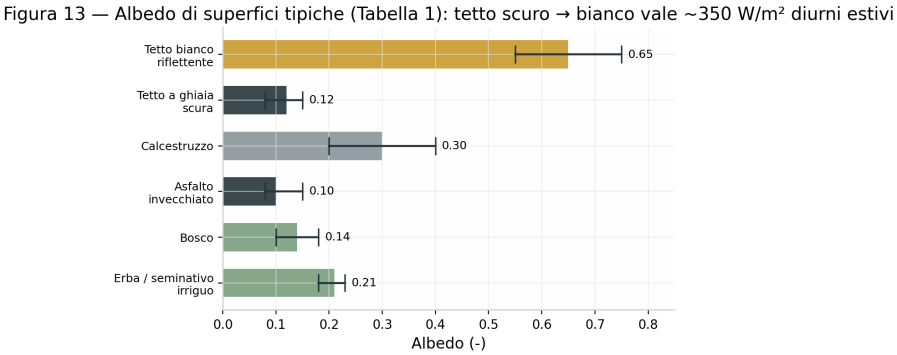



Figura 13 — Albedo di superfici tipiche (Tabella 1): la distanza tra tetto scuro e tetto bianco vale ~350 W/m² diurni estivi.

## 8.2 Rugosità e umidità del suolo

La lunghezza di rugosità $z_0$ passa da 0,01–0,1 m (colture) a 0,5–1 m (comparto costruito): aumenta la turbolenza meccanica e quindi $g_a$ (eq. 10), riducendo parzialmente il $\Delta T_s$ a parità di flusso — un piccolo feedback negativo. L'umidità del suolo controlla il rapporto di Bowen (eq. 7): un campus che preservasse irrigazione e verde su quote significative del comparto manterrebbe β basso e ridurrebbe la componente A ben oltre quanto possa fare il solo albedo. È la base fisica della prescrizione «verde e acqua in comparto» discussa in Appendice C e la misura di Phoenix (§6.6) l'ha osservata direttamente: il bacino irriguo sottovento al data center raffrescava l'aria invece di riscaldarla.

# 9 · Esempio numerico completo: il campus di riferimento da 300 MW

Sviluppiamo la catena completa per un campus di riferimento identico, per potenza e configurazione, al campus APTO dell'Appendice C: P*IT* = 300 MW, PUE = 1,25 [24], fattore di carico *f* = 0,7, raffreddamento sulle coperture a ~20–25 m, clima di pianura padana. La tabella 2 raccoglie la catena; i passaggi seguono.

Tabella 2 — Catena di calcolo della componente B per il campus di riferimento (eq. 20 e 25–30)

| Passaggio | Eq. | Valore |
|---|---|---|
| Calore dissipato a pieno carico | (17) | 375 MWth |
| Calore medio operativo (f_s = 0,7) | — | ≈260 MWth |
| Parametro di galleggiamento | (20) | ≈2.400 $m^4/s^3$ |
| Innalzamento transitorio a 200 m (classe D, u = 2 m/s) | (21) | ≈240 m |
| Innalzamento finale (neutro) | (21) | ≈1.300 m |
| Innalzamento in regime stabile (S = $5\times10^{-4}$ $s^{-2}$) | (21) | ≈300 m |
| σy, σz a 1 km, classe F, u = 1,5 m/s | (22) | ≈93 m, ≈50 m |
| Frazione al suolo f_g (H = 60–150 m, notte serena) | (19) | 1–5% |
| ΔT_B a 1 km (notte, classe F) | (23) | +0,08 – 0,40 °C (centrale +0,16) |
| ΔT_B a 1 km (giorno, classe D) | (23) | < $10^{-6}$ °C (trascurabile) |

La componente A, calcolata con le equazioni (11) e (19) e i parametri di tabella 1, dà +3–6 °C di media annua diurna sul footprint, ~+1,0 °C a 0,5 km, ~+0,3 °C a 1 km, <0,1 °C oltre 2 km. Il totale (eq. 18) e il confronto con la curva Cambridge sono il tema del capitolo seguente.

**Passaggio chiave 1 — il galleggiamento.** Con F ≈ 2.400 $m^4/s^3$ il pennacchio guadagna ~240 m nei primi 200 m di corsa (eq. 28): già al confine del comparto il nucleo del calore è a quota maggiore della cima dello strato stabile notturno. Da qui deriva la separazione dei due regimi: di giorno il calore entra nello strato rimescolato (1–1,5 km) e la sua traccia al suolo è nulla; di notte, nelle ore con inversione e vento debole, una frazione *fg* dell'ordine dell'1–5% interagisce con il suolo nel primo chilometro.

**Passaggio chiave 2 — la media climatologica.** Le condizioni di classe F con vento ≤1,5 m/s occupano in Pianura Padana il 15–25% delle ore annue (prevalentemente notturne invernali e delle mezze stagioni). Il Δ*TB* medio annuo a 1 km è quindi la media pesata: ~0,2 × (+0,16) ≈ +0,03–0,05 °C sulla media annua, con punte orarie di +0,3–0,4 °C nelle notti peggiori. Entrambe le letture, media e picco, sono riportate nelle tabelle dell'Appendice C, che applica questa stessa catena con i dati di sito.

**Passaggio chiave 3 — verifica del limite di Masley.** La stima [2] secondo cui il calore di scarico spiega l'1–3% del segnale Cambridge (+2,07 °C) corrisponde a +0,02–0,06 °C: la nostra media annua a 1 km (+0,03–0,05 °C) cade esattamente in quell'intervallo. Il modello fisico e il vincolo indipendente

convergono e le misure di Phoenix (§6.6), con il segnale dell'attività confinato entro 100–500 m, chiudono il triangolo: teoria, vincolo ingegneristico e osservazione diretta dicono lo stesso numero.

## 10 · Confronto tra le previsioni: modello cumulativo e curva Cambridge

La figura 14 sovrappone le due previsioni per il campus di riferimento: la somma A+B del modello cumulativo (con le fasce delle due componenti) e la curva Cambridge (eq. 17) calibrata sul valore centrale $\Delta T_0 = 2{,}07$ °C.

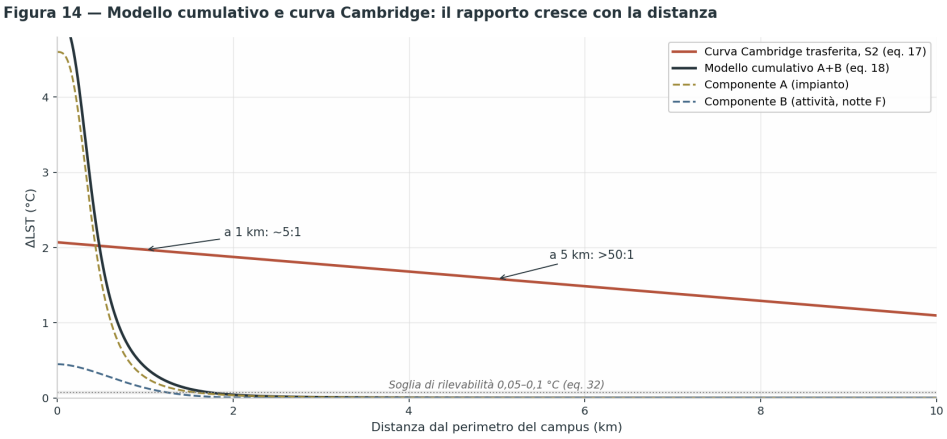



Figura 14 — Il modello cumulativo (A, B, A+B) contro la curva Cambridge trasferita (S2). Il rapporto tra le previsioni a 1 km è ~5:1 e cresce con la distanza; la linea tratteggiata è la soglia di rilevabilità (eq. 32).

Tre constatazioni. **(i) Sul footprint convergono.** Entrambe le previsioni danno un gradino di alcuni °C: sul sito la componente A da sola spiega il segnale medio dello studio Cambridge, che infatti misura soprattutto pixel di impianto. **(ii) A distanza divergono.** A 1 km: +1,9 °C (Cambridge S2) contro ~+0,4 °C (modello cumulativo, di cui ~+0,3 dalla componente A e ~+0,1–0,15 dalla B); a 5 km: +1,6 °C contro <0,02 °C. Il rapporto cresce con la distanza perché la curva lineare ha code lunghe non meccanicistiche, mentre entrambe le componenti fisiche decadono rapidamente. **(iii) La divergenza è risolvibile per via sperimentale.** Le due previsioni differiscono di un fattore 5–50 in un intervallo (0,05–2 °C) interamente accessibile alla misura: il caso di studio dell'Appendice C, con due campus quasi contigui e una rete di controllo attivabile prima dei cantieri, è un esperimento naturale decisivo (capitolo 11, §C.10). E la prima evidenza del 2026 — il segnale di Phoenix estinto entro 500 m [35] — va nella direzione del modello cumulativo, non della curva trasferita.

# 11 · Protocollo di misura, verifica e falsificazione

Il modello si impegna su previsioni misurabili; il protocollo che le verifica ha sei fasi, qui riassunte e sviluppate operativamente nell'Appendice C (§C.4). Due anelli della catena sono qui rafforzati: lo strumento satellitare di riferimento per la componente A ad alta risoluzione (§11.1) e la novità normativa che renderà pubblici i parametri oggi incerti (§11.2).

- **1. Baseline pre-costruzione.** Serie LST Landsat 8/9 (100 m) e Sentinel-3 SLSTR (1 km, giornaliero) 2015–oggi su anelli a 0,5 / 1 / 2 / 5 / 10 km; copertura del suolo da Sentinel-2 (NDVI, albedo, frazione impermeabile); normalizzazione meteorologica con le stazioni ARPA; 4–6 stazioni microclimatiche a terra su sito e controlli, da installare prima dell'apertura dei cantieri.
- **2. Siti di controllo.** Per ciascun anello, celle abbinate per copertura iniziale, latitudine, quota e falda; due tipologie: controlli «naturali» (agricolo senza trasformazioni → isolano il trend climatico) e controlli «costruiti» (insediamenti logistici/commerciali senza carichi IT → isolano la componente A dalla B).
- **3. Stima della componente A** da bilancio energetico satellitare (SEBAL/METRIC [7, 8]) o regressione sulle transizioni analoghe in pianura [30].
- **4. Stima della componente B** con la catena delle equazioni (20)–(21) e (25)–(30), validata a scala con SUEWS o WRF-Urban/BEP [9] e con le misure di campo tipo Phoenix [35].
- **5. Somma cumulativa e incertezza** (eq. 18, 31, 22) con intervalli per bootstrap spaziale e placebo test su date e siti fittizi: se il metodo trova «effetti» sui placebo, va scartato.
- **6. Verifica ex-post.** Difference-in-Differences (eq. 16) sito vs controlli, finestre mensili, ≥3 anni pre e ≥3 anni post; event-study sull'avvio dei singoli edifici; criteri di falsificazione pre-registrati: se la LST residua oltre 2 km supera +0,5 °C dopo il controllo della componente A, il modello va rivisto verso l'alto; se resta sotto +0,1 °C, la scomposizione è confermata.

## 11.1 ECOSTRESS: la risoluzione che serve alla componente A

Il punto debole dello studio Cambridge è strumentale: i pixel MODIS da 500 m–1 km mediano impianto e contesto. La risposta metrologica esiste già in orbita: la missione **ECOSTRESS** della NASA, sulla Stazione Spaziale Internazionale, fornisce LST a ~70 m di risoluzione con passaggi a ore locali variabili (inclusi quelli notturni e del tardo pomeriggio, inaccessibili a Landsat)[11] [36]. A 70 m un campus da 23 ettari si risolve in decine di pixel puri di impianto: il gradino della componente A si misura sul footprint senza miscelazione con i campi circostanti, il kernel di decadimento a 0,5–1 km si stima su pixel esterni, e le notti serene — lo scenario critico della componente B — sono finalmente osservabili da satellite. Per il protocollo del quadrante milanese: serie ECOSTRESS 2018–oggi affiancata a Landsat, con le stazioni a terra come verità di calibrazione.

[11] L.R. Lombardia 3 giugno 2026, n. 11 [41]: la cabina di regia «analizza gli aspetti di consumo energetico, idrico e relativi all'effetto "isola di calore"» e garantisce il monitoraggio anche mediante la mappatura dei centri dati esistenti.

## 11.2 Il database europeo: i parametri del modello diventano pubblici

Il limite storico del modello, «il PUE reale degli impianti non è pubblico», ha i giorni contati. La direttiva EED 2023/1791 (art. 12 e allegato VI) e il Regolamento delegato (UE) 2024/1364 obbligano i data center sopra 500 kW a comunicare annualmente, per singolo sito, consumo energetico, potenza, **PUE, WUE, ERF e REF**, con pubblicazione in un database europeo[12] [37, 38]. Per il modello cumulativo è una trasformazione epistemologica: $Q_s = P_{IT} \times PUE$ (eq. 20) smette di essere un'assunzione dichiarata e diventa un dato pubblico; l'ERF misura direttamente la frazione recuperata $f_{rec}$ dell'equazione (21); il WUE chiude il bilancio idrico dell'equazione (33). La verifica ex-post della Fase 6 potrà dunque incrociare LST satellitare con parametri di esercizio dichiarati per legge — nessuno studio osservazionale del 2026, Cambridge incluso, ha mai avuto questa possibilità.

[12] A2A–Equinix, comunicato del 2 luglio 2026 [42]: Energy Center con quattro pompe di calore di grande taglia (72 MW complessivi) e 6.000 m³ di accumulo; ~225 GWh/anno a regime, pari al fabbisogno di oltre 21.000 abitazioni.

# 12 · Limiti, sviluppi futuri e conclusioni

## 12.1 Limiti dichiarati

- Il modello è ex-ante: la componente A usa parametri da letteratura su transizioni analoghe, da ricalibrare sul territorio specifico (Fase 1 del protocollo).
- Il PUE reale degli impianti non è ancora pubblico: il range 1,25–1,40 resta un'assunzione dichiarata [24, 32, 33] fino al primo ciclo di reporting EED; ogni 0,1 di PUE sposta la componente B dell'8%.
- Le formule di Briggs e i coefficienti di dispersione sono parametrizzazioni degli anni Settanta–Ottanta [10, 20, 21]: l'incertezza a distanza è un fattore 2–3, già incluso nelle fasce (eq. 31); le misure di Phoenix [35] sono coerenti con la catena ma coprono un solo clima e taglie minori.
- Il modello è statico: non cattura il feedback acqua–calore (l'aumento della domanda evaporativa con la temperatura, eq. 13 e 14) né il degradarsi del PUE con il clima due meccanismi di amplificazione analizzati qualitativamente in Appendice C (§C.7).
- Gli effetti non termici (consumo idrico, rumore, illuminazione, frammentazione ecologica) sono fuori dal perimetro del modello ma non del caso applicativo: l'Appendice C mostra che, nel caso reale, sono le criticità dominanti e il 2026 lo ha confermato sul piano procedurale (§C.11).

## 12.2 Sviluppi

Quattro estensioni sono naturali: l'accoppiamento con un modello prognostico urbano (SUEWS/WRF-Urban) per la componente B a scala oraria; l'estensione dinamica con il feedback acqua –calore; l'integrazione sistematica del recupero del calore (eq. 21) nei bilanci di comparto, ora che i precedenti industriali esistono; la validazione sperimentale sul primo campus monitorato secondo il protocollo del capitolo 11. Il sito APTO/K2, se la Fase 1 sarà attivata prima dei cantieri, è il candidato ideale.

## 12.3 Conclusioni

Il modello cumulativo del calore scompone l'isola di calore dei data center in due termini fisicamente distinti e li quantifica separatamente: la componente di impianto (permanente, confinata al footprint e al primo chilometro, riducibile in progetto) e la componente di attività (proporzionale alla potenza, notturna, sotto la soglia di rilevabilità oltre 2 km). L'applicazione al quadrante sud di Milano (Appendice C) mostra che le due previsioni in campo, scenario massimale Cambridge e modello cumulativo, divergono di un fattore 5–50 proprio dove la misura è possibile: la scienza del caso si deciderà con un monitoraggio che costa una frazione trascurabile delle opere in gioco. Nel frattempo, le conclusioni robuste non dipendono dall'esito: il consumo di suolo è certo e irreversibile, la pressione idrica è reale, e il principio di precauzione giustifica baseline, valutazione cumulativa e clausole di revisione qualunque sia la frazione di calore che il pennacchio restituirà al suolo. Il 2026 ha inoltre spostato il piano della verifica dalla ricerca alla legge: la cornice normativa del capitolo 13 rende obbligatori la trasparenza dei parametri e il monitoraggio dell'isola di calore, e i precedenti di recupero del calore rendono praticabile la riduzione stessa della componente B.

# 13 · La cornice normativa 2026: dal modello fisico allo strumento autorizzativo

Il 2026 ha prodotto una cornice di norme che incorporano, spesso quasi letteralmente, gli elementi del modello: scomposizione per matrici, valutazione cumulativa, trasparenza dei parametri energetici, monitoraggio dell'isola di calore. Ricostruirla non è un esercizio giuridico: è verificare che il modello è oggi *operativo*, cioè richiedibile dentro procedimenti veri.

## 13.1 Il livello europeo: la direttiva EED e il Regolamento 2024/1364

La direttiva (UE) 2023/1791 sull'efficienza energetica (EED), all'articolo 12 e all'allegato VI, ha introdotto l'obbligo di monitoraggio dei data center sopra 500 kW; il Regolamento delegato (UE) 2024/1364 ne ha fissato gli indicatori e i formati: energia totale ed energia IT (da cui il PUE), consumo idrico (WUE), riutilizzo del calore (ERF) e quota rinnovabile (REF), con alimentazione di un database europeo pubblico [37, 38][13]. La portata per la valutazione d'impatto termico è diretta: gli input dell'equazione (20) e dell'equazione (21), potenza, PUE, frazione di calore recuperata, cessano di essere assunzioni e diventano dichiarazioni verificabili, sito per sito, anno per anno. Il modello cumulativo è costruito esattamente su quei parametri: la cornice europea lo ha, di fatto, dotato dei suoi dati di ingresso ufficiali.

## 13.2 Il livello nazionale: il procedimento unico del D.L. 21/2026 e la disciplina Asset

Sul piano nazionale, il 2026 ha prodotto il primo assetto sistemico. Il decreto-legge 20 febbraio 2026, n. 21, all'articolo 8 istituisce il **procedimento unico** per l'autorizzazione alla realizzazione, all'ampliamento e all'esercizio dei centri dati, con disciplina di raccordo alla verifica di assoggettabilità a VIA (istanza entro 90 giorni, a pena di archiviazione) [39, 40]. Per i programmi dichiarati di preminente interesse strategico nazionale resta il binario speciale dell'articolo 13 del D.L. 104/2023 (decreto «Asset»), cui l'art. 8 rinvia per il rilascio dell'autorizzazione unica [40]. In parallelo, la legge-delega approvata il 24 febbraio 2026 ha affidato al Governo la disciplina organica del settore , consumo di suolo, riuso delle aree dismesse, recupero del calore tra i criteri direttivi. Conseguenza pratica per il modello: il procedimento unico concentra in un unico giudizio matrici finora valutate separatamente, e le istruttorie 2026 mostrano che la commissione VIA richiede già bilanci cumulativi omogenei «per aria, acqua, rumore, suolo, calore e traffico» e la modellazione multisorgente dei poli di data center [46] esattamente l'equazione (22) applicata per legge.

## 13.3 Il livello regionale: la L.R. Lombardia 11/2026 e l'isola di calore

Il passaggio decisivo per questo saggio è regionale. La legge 3 giugno 2026, n. 11, istituisce una cabina di regia per i centri dati e le affida, testualmente, l'analisi degli impatti cumulativi degli insediamenti per consumo energetico, prelievi idrici, consumo di suolo e qualità ambientale, compreso l'inquinamento acustico, e «gli aspetti di consumo energetico, idrico e relativi all'effetto **isola di calore**»; prevede la mappatura dei centri dati esistenti e la condivisione, da parte del gestore della rete di trasmissione, della mappatura delle capacità elettriche in relazione alla localizzazione attuale e

[13] A2A Calore e Servizi–DBA–Retelit, agosto 2024 [43]: Avalon 3 (Milano, Municipio 6), 2,5 MW termici, 15 GWh/anno per 1.250 famiglie; primo progetto del genere in Italia.

potenziale degli impianti [41][14]. È la prima volta che una norma italiana nomina l'isola di calore da data center come oggetto di monitoraggio istituzionale: la questione posta dal preprint di Cambridge, e scomposta da questo modello, è entrata nel diritto. Due corollari: (**i**) Il monitoraggio non può essere un numero unico: la legge richiede analisi per matrice e per ambito a elevata concentrazione, cioè la scomposizione (15) e la sovrapposizione (29). (**ii**) La legge è nata già sotto pressione: a ottobre 2026, a quattro mesi dal varo, la giunta regionale ne ha annunciato la revisione in senso più restrittivo su aree dismesse e sostenibilità, e la Rete nazionale Stop Data Center, nata nell'estate 2026 tra i comitati di Rho, Trezzano Sul Naviglio, Abbiategrasso, Lacchiarella e decine di altri comuni, ha portato in piazza della Scala, il 10 ottobre, la prima manifestazione nazionale per una moratoria[15] [45]. La domanda sociale è la stessa del modello: non «se» costruire, ma con quali dati, quali vincoli e quale verifica.

## 13.4 Il recupero del calore: da raccomandazione a precedente industriale

La cornice si chiude sul lato della soluzione. I tre progetti italiani discussi al §5.4, Retelit–A2A–DBA a Milano Municipio 6 (2024, 15 GWh/anno per 1.250 famiglie) [43], A2A–Qarnot a Brescia (2025, liquido a 65 °C, 16 GWh/anno a regime) [44], A2A–Equinix a Settimo Milanese (2026, ~225 GWh/anno, il 20% in più per il teleriscaldamento cittadino) [42], dimostrano che l'equazione (21) ha già implementazioni industriali su tre scale crescenti. Per i campus del Parco Agricolo Sud la prescrizione di recupero (teleriscaldamento per Lacchiarella, Zibido San Giacomo, Binasco; usi agricoli in serra) ha oggi un fondamento triplo: fisico (riduce Q_eff alla fonte), economico (modelli industriali provati a pochi chilometri di distanza) e normativo (ERF pubblico, criteri della legge-delega, attese della cabina di regia regionale).

> *Sintesi del capitolo. Il 2026 ha chiuso il cerchio: la fisica del modello (capitoli 3–6) descrive ciò che la nuova cornice (EED + D.L. 21/2026 + L.R. 11/2026) prescrive di misurare, e le prescrizioni di mitigazione (recupero, aree dismesse, cumulatività) hanno smesso di essere proposte per diventare prassi autorizzativa. Il modello cumulativo è nato come correzione di uno studio; questo volume lo consegna come strumento di procedura.*

[14] Il Post, 18 ottobre 2026 [45]: la Rete nazionale Stop Data Center, nata nell'estate 2026 presso la Fornace di Rho, riunisce una quarantina di comitati; prima manifestazione nazionale in piazza della Scala il 10 ottobre 2026; richiesta di moratoria inviata al Governo il 9 ottobre.

[15]

# Appendice A · Costanti e parametri di letteratura

Tabella A1 — Costanti fisiche e parametri atmosferici utilizzati

| Simbolo | Grandezza | Valore | Fonte |
|---|---|---|---|
| R* | Costante dell'aria secca | 287 J $kg^{-1}$ $K^{-1}$ | [11, 18] |
| g | Accelerazione di gravità | 9,81 m/$s^2$ | — |
| c_p | Calore specifico dell'aria | 1005 J $kg^{-1}$ $K^{-1}$ | [11, 18] |
| σ | Costante di Stefan–Boltzmann | $5{,}670\times10^{-8}$ W $m^{-2}$ $K^{-4}$ | CODATA |
| $S_0$ | Costante solare | 1361 W/$m^2$ | [25] |
| κ | Costante di von Kármán | 0,40 (0,35–0,40) | [11] |
| Γ_d | Gradiente adiabatico secco | 9,8 K/km | eq. (3) |
| H_s | Scala di altezza | ≈8,4 km | eq. (1) |
| g_W | Conduttanza superficie–aria | 12–24 W $m^{-2}$ $K^{-1}$ | eq. (8)–(10) |
| α_PT | Coefficiente di Priestley–Taylor | 1,26 | [19] |

Tabella A2 — Parametri operativi del campus di riferimento (capitolo 9; identici ad APTO, Appendice C)

| Parametro | Valore | Nota |
|---|---|---|
| Potenza IT | 300 MW | 300 MVA di connessione |
| PUE | 1,25 (fascia 1,25–1,40) | [24]; confronto 2026 in [32, 33] |
| Fattore di carico | 0,7 | assunzione dichiarata |
| Quota di rilascio | 20–25 m | coperture |
| Vento notturno (classe F) | 1,5 m/s | prudenziale |
| Parametro di stabilità | $5\times10^{-4}$ $s^{-2}$ | inversione moderata |

# Appendice B · Algoritmo di calcolo completo

La sequenza operativa del modello cumulativo, dalla potenza elettrica al campo di temperatura, con il rinvio alle equazioni:

- **1. Input di progetto:** $P_{IT}$, PUE atteso, fattore di carico $f_s$, quota di rilascio, geometria del comparto, uso del suolo pre-esistente.
- **2. Componente A:** calcolare $\Delta\alpha$, $\Delta LE$ (eq. 12–14) e $\Delta F_A$ (eq. 19); convertire in $\Delta T_s$ con la conduttanza (eq. 8–11); applicare il kernel spaziale di mescolamento (scala 0,3–0,5 km).
- **3. Componente B:** $Q_s = P_{IT} \times PUE$ (eq. 20), $Q_s \rightarrow f_s Q_s$; F da eq. (27); se previsto recupero, applicare l'eq. (21) prima della catena di dispersione.
- **4. Classificazione di stabilità oraria** da dati meteo (Pasquill–Gifford [21]; controllo con L e Ri, eq. 23–24).
- **5. Innalzamento $\Delta h$** per regime (eq. 28) → quota efficace $H = h_s + \Delta h$.
- **6. Dispersioni $\sigma_y(x)$, $\sigma_z(x)$** (eq. 26); frazione al suolo $f_g$ (eq. 29); anomalia $\Delta T_B(x)$ (eq. 30).
- **7. Somma $\Delta T_{tot} = \Delta T_A + \Delta T_B$** (eq. 18); per più impianti, sovrapposizione (eq. 22).
- **8. Incertezza in quadratura** (eq. 31) → fascia di stima; confronto con la soglia di rilevabilità (eq. 32): previsioni sotto soglia vanno dichiarate «non misurabili».
- **9. Verifica:** attivare il protocollo di misura (capitolo 11) prima dei cantieri; i criteri di falsificazione sono parte del modello; dal primo ciclo EED, sostituire i parametri assunti con quelli pubblici del database europeo (§11.2).

> *Nota di riproducibilità. Tutti i valori numerici del capitolo 9 e dell'Appendice C sono ottenibili con questa sequenza e i parametri di Appendice A, senza coefficienti nascosti. I dati di calcolo del caso applicativo sono disponibili su richiesta all'autore.*

# Appendice C · Applicazione del modello: l'isola di calore dei data center nel Parco Agricolo Sud Milano (campus APTO e K2 Strategic)

Questa appendice applica integralmente il modello ai due campus in procedura nel Parco Agricolo Sud Milano, sviluppando in forma aggiornata al novembre 2026 il rapporto tecnico di ottobre 2026: stato procedurale aggiornato (§C.11), estensione del progetto K2 anche al comune di Lacchiarella, entrata in istruttoria del terzo polo del quadrante (Amazon Edificio A, Zibido), e bilancio idrico formalizzato con l'equazione (33).

> *Nota metodologica. I siti non sono ancora in esercizio: non esiste un «dopo» da misurare. Qualunque valutazione è ex-ante: si può trasferire una curva dose-risposta dalla letteratura (§C.3) oppure costruire una previsione dalle componenti fisiche del calore (modello cumulativo, §C.4–C.5). La distanza APTO–K2 è ~1,6 km tra i centroidi dei comparti (verificata sulle coordinate: Badile 45°21'02"N, 9°07'37"E; area Il Girasole/H2a ~45,3336°N, 9,1225°E → 1,93 km tra i riferimenti, ~1,0 km tra i bordi [31]).*

## C.1 Perché un modello nuovo: le sei lacune del metodo Cambridge

L'analisi critica dello studio di Cambridge [1], che motiva tutto il lavoro, si condensa in sei punti, sviluppati nel capitolo 4 e richiamati qui perché l'applicazione al sito (§C.3.6) li ha fatti emergere uno per uno: (1) nessuna scomposizione delle sorgenti (edificio ed esercizio sommati in un solo $\Delta T_0$; la contro-analisi Uruguay attribuisce ~17% all'esercizio [13]); (2) nessun gruppo di controllo (event-study prima/dopo, eq. 16 senza il secondo termine); (3) pixel sovradimensionati (500 m–1 km: bias di miscelazione tra impianto e contesto); (4) nessuna relazione potenza-effetto (la media del campione applicata a campus da 300–400 MW è estrapolazione); (5) decadimento calibrato su tre punti (la curva 14 è un'interpola-estrapolazione, non una legge fisica); (6) LST ≠ temperatura dell'aria (gli impatti sanitari dipendono dall'aria a 2 m).

## C.2 I due progetti e il quadrante

Tabella C1 — Dati essenziali dei progetti (atti VIA e fonti pubbliche [15, 27, 46])

| Elemento | Campus APTO (Lacchiarella) | K2 Strategic (Zibido S.G. – Lacchiarella) |
|---|---|---|
| Potenza di connessione | 300 MVA | fino a 400 MW |
| Superficie di comparto | 228.000 m² (~23 ha) | comparto di Badile e estensione verso Lacchiarella (2026) |
| Generatori diesel | 160 gruppi, 1.010 MWth | da progetto; la CTVA chiede test coordinati con APTO |
| Configurazione | 5 edifici (S1–S5) | sviluppo per fasi |
| Stato procedurale (nov. 2026) | VIA in istruttoria CTVIA; osservazioni chiuse il 1° ottobre 2026; parere tecnico MiC del 4 marzo 2026 | in procedura; il SIA di Zibido (giu. 2026) già lo include come progetto prevedibile [46] |

Il quadrante sud-ovest milanese ospita inoltre gli impianti di Rozzano e i progetti di Noviglio e Siziano, e dal 2026 la procedura VIA dell'Amazon Edificio A di Zibido San Giacomo (ID 14476) [46]: la concentrazione che la L.R. 11/2026 chiama «ambito a elevata concentrazione» è già un fatto amministrativo. La figura C1 schematizza siti e anelli di valutazione; la figura C5 (§C.11) ricostruisce la cronologia 2024–2026.

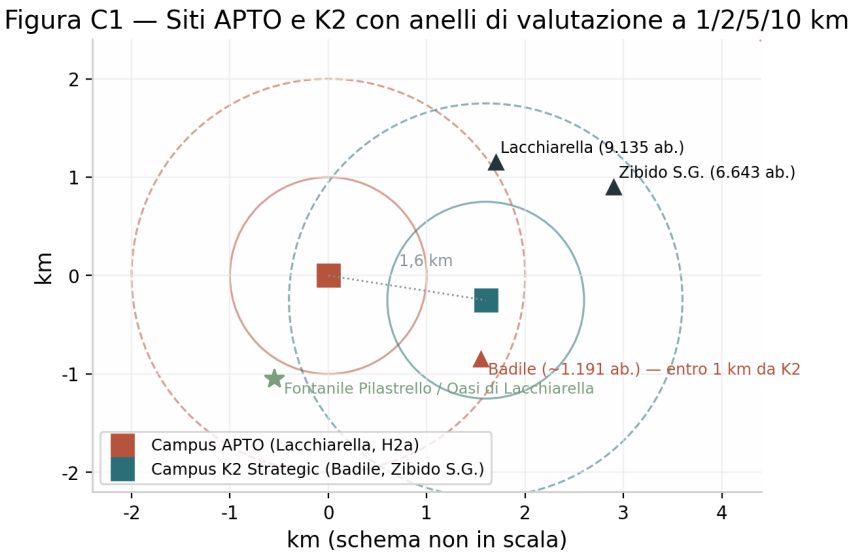



Figura C1 — Schema dei siti APTO e K2 Strategic con gli anelli di valutazione a 1/2/5/10 km (schema non in scala). Nel 2026 il quadrante include la terza procedura (Amazon Edificio A, Zibido).

## C.3 Applicazione del metodo Cambridge al sito di studio

Il primo passo è applicare il metodo Cambridge, così com'è, all'area Lacchiarella – Zibido San Giacomo: assumere la dose-risposta di Marinoni et al. come data, ricostruire la funzione di decadimento che il preprint non pubblica, e proiettarla sui campus in progetto. L'esercizio produce i risultati di §C.3.4 e, soprattutto, fa emergere le lacune del metodo (§C.3.6), dalle quali nasce l'esigenza del modello cumulativo.

### *C.3.1 Perimetro e posizionamento dei siti*

Il perimetro copre il raggio di 10 km dai due impianti, il limite oltre il quale lo studio di Cambridge non rileva più effetto, interessando 13 comuni tra la Città metropolitana di Milano e la provincia di Pavia. Il Comune di Zibido San Giacomo ha trasmesso parere contrario (gennaio 2026); i comitati hanno raccolto oltre 800 firme e nel 2026 sono confluiti nella Rete nazionale Stop Data Center (§C.11).

### *C.3.2 La curva dose-risposta ricostruita*

La forma adottata è la lineare a tratti dell'equazione (17), calibrata sui tre dati pubblici del preprint. Controllo di coerenza interno: il quarto dato disponibile (+1 °C misurabile a 4,5 km) è rispettato e il modello dà 1,67 °C a 4,5 km nello scenario centrale, sopra la soglia dichiarata dal preprint.

Tabella C2 — Scenari applicati ($\Delta T_0$ per singolo impianto; nel campo combinato i contributi si sommano, eq. 22)

| Scenario | $\Delta T_0$ (°C) | Base |
|---|---|---|
| S1 — Prudenziale | 1,5 | Estremo inferiore del 95° percentile dello studio Cambridge |

| Scenario | $\Delta T_0$ (°C) | Base |
|---|---|---|
| S2 — Centrale | 2,07 | Media dello studio su 8.400 impianti |
| S3 — Severo | 2,4 | Estremo superiore del 95° percentile; plausibile per impianti ben sopra la taglia media |
| S4 — Estremo | 9,1 | Massimo osservato nello studio; riportato per completezza, ritenuto poco probabile |

**Figura C2 — Curva dose-risposta ricostruita (eq. 17) negli scenari S1–S3**

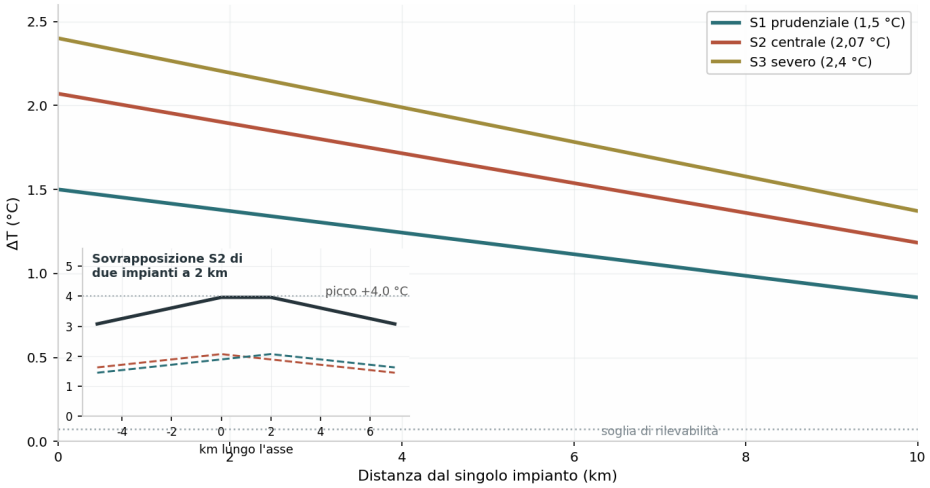



Figura C2 — Curva dose-risposta ricostruita (eq. 17) negli scenari S1–S3; nel riquadro, la sovrapposizione lineare S2 sull'asse APTO–K2 con picco +4,0 °C.

### *C.3.3 Scenari e sovrapposizione lineare*

In assenza di un modello pubblicato di interazione tra impianti, si adotta la sovrapposizione lineare dei due campi (eq. 22): ΔT_tot = ΔT_APTO + ΔT_K2 ipotesi semplificata che produce una stima di limite superiore nella fascia tra i siti.

### *C.3.4 Risultati: campo termico, popolazione e suolo agricolo esposti*

**Campo termico combinato.** Nello scenario centrale S2 il massimo atteso è +4,0 °C nell'area tra i due impianti (asse Girasole–Badile, tra SP105, SP40 e Naviglio Pavese); lo scenario severo S3 porta il picco a +4,6 °C e il «+5 gradi» denunciato dai comitati risulta quindi coerente con un'applicazione letterale dello studio di Cambridge a due impianti quasi contigui.

Tabella C3 — Comuni entro 10 km: distanze dai siti, ΔT atteso al centro abitato per scenario (eq. 17 + 29), residenti

| Comune | d APTO (km) | d K2 (km) | ΔT S1 | ΔT S2 | ΔT S3 | Residenti |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Lacchiarella | 1,7 | 3,2 | +2,7 | +3,7 | +4,3 | 9.135 |
| Zibido San Giacomo | 3,1 | 1,8 | +2,7 | +3,7 | +4,3 | 6.643 |
| Binasco | 2,8 | 3,4 | +2,6 | +3,6 | +4,2 | 7.059 |
| Basiglio | 3,1 | 2,5 | +2,6 | +3,6 | +4,2 | 8.027 |

| Comune | d APTO (km) | d K2 (km) | ΔT S1 | ΔT S2 | ΔT S3 | Residenti |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Casarile | 2,8 | 4,1 | +2,6 | +3,5 | +4,1 | 3.929 |
| Rozzano | 5,7 | 4,3 | +2,4 | +3,3 | +3,8 | 41.724 |
| Pieve Emanuele | 5,8 | 5,8 | +2,3 | +3,1 | +3,6 | 15.846 |
| Siziano (PV) | 6,3 | 7,2 | +2,1 | +2,9 | +3,4 | 6.535 |
| Vernate | 5,9 | 6,6 | +2,2 | +3,0 | +3,5 | 3.436 |
| Noviglio | 6,8 | 6,1 | +2,2 | +3,0 | +3,5 | 4.534 |
| Giussago (PV) | 6,2 | 7,8 | +2,1 | +2,9 | +3,4 | 5.343 |
| Opera | 7,6 | 7,1 | +2,1 | +2,8 | +3,3 | 14.463 |
| Certosa di Pavia (PV) | 9,0 | 10,6 | +0,9 | +1,3 | +1,5 | 5.435 |
| Totale | | | | | | 132.109 |

**Nota**: i ΔT si riferiscono alla temperatura superficiale del suolo (LST), non alla temperatura dell'aria a 2 m, grandezza più rilevante per la salute.

Tabella C4 — Superfici agricole stimate (ha) oltre soglia di ΔT, per scenario (SAU 72% di ~346 km² di impronta)

| Soglia ΔT | S1 prudenziale | S2 centrale | S3 severo |
|---|---|---|---|
| ≥ 0,5 °C | ≈ 24.900 | ≈ 24.900 | ≈ 24.900 |
| ≥ 1,0 °C | ≈ 20.300 | ≈ 24.900 | ≈ 24.900 |
| ≥ 1,5 °C | ≈ 20.300 | ≈ 20.300 | ≈ 20.700 |
| ≥ 2,0 °C | ≈ 13.600 | ≈ 20.300 | ≈ 20.300 |
| ≥ 3,0 °C | — | ≈ 9.300 | ≈ 17.300 |
| ≥ 4,0 °C | — | — | ≈ 3.400 |

Gli ~9.300 ha con ΔT ≥ 3 °C (S2) equivalgono a circa il 25% della superficie agricola del Parco Agricolo Sud; l'area con ΔT ≥ 1 °C ne copre circa i due terzi. Dentro l'impronta ricadono risaie della fascia sud-occidentale, aziende foraggere, tratti della rete irrigua da Naviglio Grande e Pavese, il fontanile Pilastrello (interno al comparto H2a) e l'Oasi di Lacchiarella [29].

### *C.3.5 Discussione e raccomandazioni*

Per l'agricoltura: un riscaldamento del suolo di 2–4 °C, se reale e persistente, agirebbe su cicli fenologici, evapotraspirazione (eq. 12–14), fabbisogno irriguo, stress estivo su mais e foraggere e gestione delle risaie sommerse. Il punto più delicato sono i fontanili, termoregolatori naturali del paesaggio agrario: il rischio principale non è termico diretto ma idrico (competizione per i corpi idrici, alterazione della falda con vasche, drenaggi e impermeabilizzazione). Per la popolazione: la LST non è la temperatura dell'aria, ma un incremento permanente del substrato e si traduce tipicamente in incremento notturno dell'aria, nella fascia in cui il corpo recupera dalle ondate di calore, in un'area con età media 45–48 anni e isola di calore milanese preesistente.

Due conclusioni restano in piedi qualunque sia la quota di segnale attribuibile all'esercizio: la perdita diretta di suolo agricolo è certa e irreversibile; nessuna VIA italiana esaminata misura o modella l'effetto termico. Il precedente di Magenta (data center MXP, 1.099 MWt di generatori) afferma che «la presenza del data center non determina alterazioni del clima locale», l'opposto della letteratura 2026. Da qui sei raccomandazioni: (1) baseline termica pre-operativa (Landsat/ECOSTRESS + stazioni agrometeorologiche a distanze graduate, prima dei cantieri); (2) valutazione cumulativa obbligatoria per il «triangolo dei data center»; (3) vincolo di recupero del calore (teleriscaldamento per Lacchiarella, Zibido San Giacomo, Binasco; usi agricoli) oggi sostenuto dai precedenti A2A–Equinix, Retelit e Qarnot (§5.4); (4) compensazione idrica e di suolo; (5) monitoraggio partecipato open data con Ente Parco, Comuni e Università; (6) clausola di revisione con soglie predefinite e verifica satellitare indipendente.

### *C.3.6 Le lacune del metodo Cambridge emerse dall'applicazione*

- **1. Nessuna scomposizione delle sorgenti.** La $\Delta T_0$ del preprint somma effetto edificio ed effetto esercizio: la contro-analisi Uruguay indica che la quota operativa è ~17% del segnale [13].
- **2. Nessun gruppo di controllo.** L'event-study confronta solo prima/dopo (eq. 16 senza il secondo termine): non distingue l'impianto dal trend climatico regionale.
- **3. Pixel sovradimensionati.** Anche ricostruiti a 500 m, i pixel MODIS mediano impianto e contesto: bias di miscelazione.
- **4. Nessuna relazione potenza-effetto.** Applicare la media del campione a due campus da 300–400 MW è estrapolazione con incertezza simmetrica.
- **5. Decadimento calibrato su tre punti.** La curva (14) è un'interpola-estrapolazione, non una legge fisica: i −4,3%/km lineari producono code lunghe (+1,2 °C a 10 km) senza giustificazione meccanicistica.
- **6. LST ≠ temperatura dell'aria.** Gli impatti sanitari dipendono dall'aria a 2 m: il passaggio richiede i modelli microclimatici del capitolo 6.

> *Conseguenza metodologica. Le lacune 1, 2 e 5 non sono correggibili «aggiustando» la curva: richiedono un modello che costruisca il campo termico dalle due sorgenti fisiche separate e poi le sommi cumulativamente, con controlli sperimentali. È il modello cumulativo (capitolo 5), applicato qui di seguito.*

## C.4 Il modello cumulativo applicato: struttura del calcolo

L'applicazione segue l'algoritmo di Appendice B e l'ipotesi causale dell'equazione (18): ΔLST_tot = ΔLST_A + ΔLST_B + ΔLST_clima (da rimuovere) + ε. Le sei fasi del protocollo (capitolo 11) sono qui richiamate con i dati di sito. **Fase 0 — ipotesi causale**: eq. (18). **Fase 1 — baseline pre-costruzione (da avviare subito)**: LST da Landsat 8/9 (100 m) e Sentinel-3 SLSTR (1 km, giornaliero), serie 2015–oggi, su griglia centrata sul comparto H2a con anelli a 0,5 / 1 / 2 / 5 / 10 km, affiancata da ECOSTRESS (70 m, §11.1) per i pixel puri di impianto; copertura suolo da Sentinel-2 (10 m) → NDVI, albedo, frazione impermeabile; meteo dalle stazioni ARPA Lombardia (Binasco, Pavia, Rozzano); 4–6 stazioni microclimatiche a terra su sito e controlli. **Fase 2 — siti di controllo (risposta alla lacuna 2)**: controlli «naturali» (aree agricole del Parco senza progetti → isolano il trend climatico) e controlli «costruiti» (insediamenti logistici/commerciali senza carichi IT → isolano la componente B dalla A). I data center

di Noviglio e Siziano non sono controlli validi (stesso trattamento), ma entrano come covariate per gli effetti cumulativi (eq. 22). **Fase 3 — componente A**: mappare la transizione seminativo → impermeabile sui 23 ettari (ΔNDVI, Δalbedo da Sentinel-2); stimare ΔLST_A con bilancio energetico di superficie (eq. 5–13, 16, 27; SEBAL/METRIC [7, 8]) o via regressione sulle transizioni analoghe in Pianura Padana 2017–2024; decadimento spaziale con kernel di mescolamento (scala 0,3–0,5 km). **Fase 4 — componente B**: catena delle equazioni (20) e (25)–(30), come sviluppato nel capitolo 9 per l'identica configurazione; validazione di scala con SUEWS o WRF-Urban/BEP [9] e con il protocollo di misura mobile tipo Phoenix [35]. **Fase 5 — somma cumulativa e incertezza**: eq. (18) e (24); modello multilivello con residui spazio-temporali correlati, intervalli per bootstrap spaziale, placebo test su date e siti fittizi. **Fase 6 — monitoraggio ex-post e verifica**: DiD (eq. 16) sito vs controlli, finestre mensili, ≥3 anni pre / ≥3 anni post; event-study sull'avvio dei singoli edifici (S1–S5 entrano in funzione in tempi diversi → 5 pseudo-esperimenti naturali); criteri di falsificazione pre-registrati: se ΔLST oltre 2 km supera +0,5 °C dopo controllo della componente A, il modello va rivisto.

## C.5 Risultati per il campus APTO

### *C.5.1 Componente A — calore dell'impianto*

Conversione di ~23 ha da seminativo a tetti/asfalto. Dalla teoria (eq. 11 e 19, con ΔF ≈ +100 W/m² diurni estivi → ΔT_s ≈ +4 – 8 °C) e dalla letteratura sulle transizioni osservate in pianura (ΔLST diurno estivo coltura → capannone: +5–12 °C; media annua diurna: +3–6 °C [30]):

Tabella C5 — Componente A: ΔLST atteso per distanza (eq. 11, 19 + letteratura)

| Distanza | ΔLST atteso (A) |
|---|---|
| Sul footprint | +3 – 6 °C (media annua diurna; picchi estivi maggiori) |
| 0,5 km | ~+1,0 °C |
| 1 km | ~+0,3 °C |
| ≥ 2 km | < 0,1 °C (irrilevante) |

### *C.5.2 Componente B — calore dell'attività*

La catena completa (eq. 20 e 25–30) è quella del capitolo 9, tabella 2: Q_s = 300 × 1,25–1,40 = 375–420 MWth a pieno carico; Q_s medio ≈ 260 MWth; F ≈ 2.400 $m^4/s^3$ (eq. 27); pennacchio a ~240 m già a 200 m di distanza e oltre 1 km in regime neutro (eq. 28). I 1.010 MWth dei 160 generatori diesel incidono solo in test/emergenza: contributo medio annuo trascurabile, da valutare per i picchi — la CTVA del procedimento Zibido chiede appunto programmi di test vincolanti e coordinati tra gli impianti del quadrante [46].

Tabella C6 — Componente B: ΔLST per distanza (eq. 25–30)

| Distanza | Limite superiore teorico[1] | Stima realistica[2] |
|---|---|---|
| Sul footprint | flusso locale ~1.650–1.840 W/m² | qualche °C solo presso le torri |
| 0,5 km | +21 – 42 °C | ~+0,6 °C |
| 1 km | +5,3 – 10,5 °C | ~+0,15 °C |
| 2 km | +1,3 – 2,6 °C | ~+0,04 °C |

| Distanza | Limite superiore teorico[1] | Stima realistica[2] |
|---|---|---|
| 10 km | +0,05 – 0,11 °C | ~+0,001 °C |

[1] Se tutto il calore restasse a livello del suolo distribuito uniformemente (fisicamente impossibile).
[2] Corretta per l'innalzamento del pennacchio (eq. 28) e per la frazione al suolo (eq. 29): il calore sale e si disperde in quota.

### *C.5.3 Somma cumulativa (A + B)*

Tabella C7 — ΔLST totale atteso per distanza (modello cumulativo, eq. 18)

| Distanza | ΔLST totale atteso |
|---|---|
| Sul sito | +3 – 7 °C (dominato dalla componente impianto) |
| 1 km | ~+0,4 °C |
| 2 km | ~+0,05 °C |
| 5–10 km | < 0,02 °C — sotto la soglia rilevabile da satellite (eq. 32) |

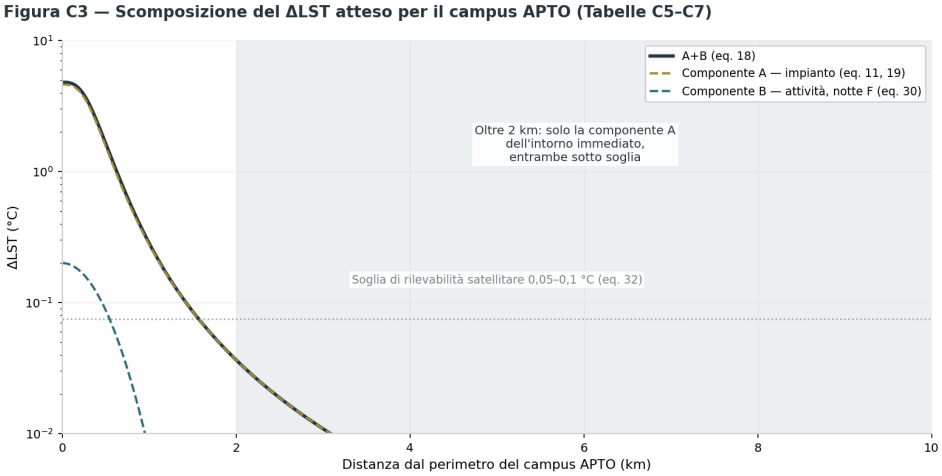



Figura C3 — Scomposizione del ΔLST in componente A (impianto) e componente B (attività) in funzione della distanza dal perimetro del campus APTO (Tabelle C5–C7).

### *C.5.4 Risultati critici dal punto di vista scientifico*

- **1.** Il gradino sul sito sarà reale e misurabile (+3–7 °C), ma sarà quasi interamente effetto dell'impianto edilizio, non dell'attività di calcolo: un satellite che lo rilevasse non proverebbe l'esistenza di un «data heat island» operativo ma proverebbe che è stato costruito un edificio. Qualunque rilevazione futura dovrà essere letta attraverso la scomposizione (eq. 18), pena la ripetizione dell'errore di attribuzione del preprint.
- **2.** La componente attività è fisicamente confinata: l'innalzamento del pennacchio (eq. 28) porta il calore in quota; a 1 km la stima realistica è ~+0,15 °C e a 2 km ~+0,04 °C. Il raggio di influenza di 10 km dello studio Cambridge è insostenibile per la componente operativa di un singolo impianto; le misure di Phoenix (§6.6) confermano il confinamento entro poche centinaia di metri.

- **3.** La divergenza con l'applicazione del metodo Cambridge è quantificata: a 1 km, +1,9 °C (curva Cambridge trasferita, S2) contro +0,4 °C (modello cumulativo): un rapporto ~5:1 che cresce con la distanza (figura 14 del capitolo 10).
- **4.** La previsione è falsificabile: il modello impegna valori puntuali e soglie (es. ΔLST residuo < 0,5 °C oltre 2 km dopo controllo della componente A). La curva Cambridge trasferita non offre criteri di falsificazione locali: questa è la differenza scientifica decisiva tra i due approcci.
- **5.** Coerenza con l'unica scomposizione empirica disponibile (Uruguay, Landsat: 83% suolo / 17% esercizio [13]): il modello cumulativo applicato al caso APTO produce rapporti tra le componenti dello stesso ordine, senza averli assunti.

## C.6 Criticità per recettore: popolazione, sorgenti idriche, flora, fauna, agricoltura

Applicando i risultati di §C.5 e §C.9 ai recettori presenti nell'area, le criticità si distribuiscono in modo molto diseguale tra i due approcci: lo scenario massimale (applicazione del metodo Cambridge) descrive un impatto sanitario e agricolo di rilievo regionale; il modello cumulativo circoscrive l'impatto termico ai primi 1–2 km e sposta il baricentro delle criticità reali su acqua, suolo e frammentazione. **Popolazione.** Scenario massimale: 132.109 residenti entro 10 km esposti a +1–4 °C di LST (tabella C3); modello cumulativo: effetto rilevante solo per Badile (~1.191 residenti entro 1 km da K2 [31]) e le cascine dell'anello interno, e principalmente come persistenza notturna della componente A. **Sorgenti idriche e fontanili.** Il reticolo (254 fontanili attivi nel Parco [29], acqua a 12–14 °C) è sensibilissimo a riduzioni di portata e variazioni termiche: il rischio è legato a prelievi e drenaggi, non al calore disperso in aria. **Flora e fauna.** Oasi di Lacchiarella a ridosso dei siti (pressione da rumore, illuminazione notturna, trasformazione del contesto); avifauna svernante di risaie e stoppie (perdita di ~48 ha utili per i due campus, più opere connesse); frammentazione del corridoio ecologico primario e nuovi elettrodotti 380 kV: incidono sulla connettività più del ΔLST.

**Il bilancio idrico, formalizzato.** La domanda idrica dei due campus si scrive, in forma chiusa, come nuova equazione del modello:

$$W = P_{\mathrm{IT}} \times PUE \times 8760\ h \times f_s \times WUE \qquad (33)$$

con WUE (Water Usage Effectiveness) in L/kWh. Con WUE = 1,0–1,8 L/kWh i due campus richiedono **4,3–7,7 milioni di m³/anno** di domanda potenziale, in competizione con l'irriguo nei mesi secchi. Il procedimento Zibido mostra la scala dei singoli impianti: per il solo Amazon Edificio A il fabbisogno dichiarato è ~24.000 m³/anno da due pozzi da 50 m (21 l/s di picco), e la CTVA ne chiede la trasformazione in limite autorizzativo con bilancio mensile e pubblicazione annuale dei dati [46] — esattamente ciò che l'equazione (33) e l'indicatore WUE del Regolamento 2024/1364 rendono strutturali.

Tabella C9 — Criticità economiche per le aziende agricole e zootecniche entro 10 km

| Canale | Scenario massimale (Cambridge S2) | Modello cumulativo (stima) | Nota |
|---|---|---|---|
| Rese colturali | +2–3 °C su ~9.300–20.300 ha: stress per calore su mais e foraggere, perdite | <0,1 °C oltre 2 km: nessun effetto rese attribuibile al calore operativo | Divario decisivo; verificabile con Fase 6 |

| Canale | Scenario massimale (Cambridge S2) | Modello cumulativo (stima) | Nota |
|---|---|---|---|
| | potenziali a due cifre % (−5–7% rese mais per °C estivo) | | |
| Fabbisogno irriguo | Evapotraspirazione +4–6% su area vasta (eq. 13, 14) | Variazione termica trascurabile; rischio solo da competizione idrica | La partita è sull'acqua, non sul calore |
| Risaia sommersa | Alterazione termica dell'acqua di sommersione, infestanti favorite | Rischio solo se i prelievi riducono la portata di rogge/fontanili a monte | Tutelare portate minime irrigue |
| Allevamenti (bovine da latte) | Peggioramento del THI estivo → calo produzione lattea e benessere animale | ΔT aria trascurabile oltre 1–2 km: effetto non atteso | Monitoraggio THI nelle cascine entro 2 km |
| SAU | Sottrazione di ~48 ha diretti + opere connesse (stazione Terna, elettrodotti, viabilità) | perdita produttiva certa e irreversibile | Da compensazione di suolo nel Parco |
| Opportunità compensativa | — | Recupero del calore di scarto per serre e teleriscaldamento rurale (eq. 21): l'esternalità diventa risorsa | Precedenti: Settimo Milanese, Brescia (§5.4) |

Sintesi per recettore. Secondo il modello cumulativo, le criticità certe e prioritarie sono: competizione idrica su falda e fontanili (4,3–7,7 milioni di m³/anno di domanda potenziale, eq. 33), perdita e frammentazione di suolo agricolo, effetti di bordo (termici, acustici, luminosi) entro 500 m–1 km. Le criticità termiche diffuse su popolazione, flora, fauna e profitti agricoli entro 10 km appartengono allo scenario massimale del metodo Cambridge: sono la ragione per cui la baseline e il monitoraggio vanno attivati prima dei cantieri, non la previsione centrale.

## C.7 Cambiamento climatico e interazione con il calore dei campus

Le valutazioni di §C.3–C.6 sono riferite al clima attuale. I due campus, però, hanno una vita attesa di 25–40 anni: nel corso dell'esercizio la baseline climatica regionale si sposta, per la Pianura Padana le proiezioni indicano +1,5–2,5 °C a metà secolo nello scenario intermedio e oltre +4 °C a fine secolo nello scenario alto [12], con ondate di calore più frequenti e intense. L'anomalia termica dei data center non sostituisce questo riscaldamento: vi si somma. Sei meccanismi di interazione, quasi tutti di amplificazione reciproca: **(1) una baseline che si sposta** — le soglie che contano sono assolute (35 °C, notti tropicali, THI), e per Badile (~1.191 residenti) le ondate future partono da un «pavimento» locale più alto; **(2) coincidenza dei picchi** — il carico di raffreddamento è massimo durante le ondate, e i 160 gruppi diesel (1.010 MWth) si testano tipicamente durante crisi di rete da caldo, nelle condizioni di massima formazione di ozono; **(3) il feedback acqua–calore** — la domanda evaporativa cresce ~7%/°C (eq. 13) proprio quando la portata estiva dei fontanili cala: più caldo → più evaporazione per kWh → più prelievo → meno raffrescamento naturale → LST più alta; **(4) il feedback energetico** —

temperature più alte degradano il PUE (eq. 20) e riducono le ore di free-cooling: il dimensionamento andrebbe riferito al clima 2050–2060; **(5) recettori sotto doppio stress** — i fontanili come rifugi termici vedono erosa la loro funzione proprio quando serve di più; **(6) notti tropicali** — la componente A persiste di notte per inerzia termica, ed è l'indicatore sanitario prioritario per l'anello interno.

> *Punto chiave. Il cambiamento climatico modifica poco il ΔT dell'impianto — pilotato dall'energia dissipata — ma ne alza la base: ciò che determina gli impatti è la temperatura assoluta risultante dalla somma. Due conseguenze: (a) il monitoraggio di Fase 6 con siti di controllo resta l'unico modo di separare il trend climatico regionale dal segnale d'impianto — il DiD (eq. 16) lo gestisce per costruzione; (b) la valutazione va condotta su temperature assolute future (baseline climatica + Δ impianto), non sul solo Δ.*

## C.8 Limiti e raccomandazione operativa

- Stima ex-ante: la componente A usa parametri da letteratura (da ricalibrare su transizioni locali osservate);
- il PUE reale non è pubblico: il range 1,25–1,40 è un'assunzione [24, 32, 33], in attesa del primo ciclo di reporting EED (§11.2);
- l'effetto cumulativo con Noviglio/Siziano, con il polo Amazon di Zibido San Giacomo e con lo sviluppo degli ambiti H1–H2 può spostare la componente A a scala di comprensorio;
- il contributo dei generatori diesel è trascurabile in media annua ma va valutato per episodi di emergenza (calore + NOx in bassa ventilazione) — la CTVA lo richiede già in forma vincolante [46];
- la verifica definitiva richiede il monitoraggio di Fase 6.

Raccomandazione operativa. Il progetto è in istruttoria CTVIA: è il momento utile per richiedere l'installazione della rete di monitoraggio microclimatico di Fase 1 prima dell'apertura del cantiere; altrimenti la baseline satellitare 2015–2026 resterà l'unico riferimento «pre» e ogni verifica ex-post erediterà le stesse ambiguità dello studio di Cambridge.

## C.9 Scenario cumulativo con l'ipotesi K2 Strategic (e il terzo polo)

Il modello cumulativo del calore si estende naturalmente al caso multisorgente: le somme A+B dei campus si sovrappongono spazialmente (eq. 22). Con K2 (400 MW) a ~1,6 km da APTO — ~924 MWth complessivi a pieno carico:

Tabella C11 — ΔLST cumulativo secondo il modello cumulativo (APTO 300 MVA + K2 400 MW, siti a 1,6 km; eq. 22)

| Distanza da APTO | APTO solo | Cumulativo (APTO + K2) |
|---|---|---|
| Punto medio tra i campus | — | ~+1,4 °C |
| 1 km | +0,4 °C | +0,8 °C |
| 2 km | +0,05 °C | +0,10 °C |
| ≥ 5 km | < 0,02 °C | < 0,02 °C |

Figura C4 — Scenario cumulativo APTO + K2 (~924 $MW_{th}$): nessuna isola di calore regionale

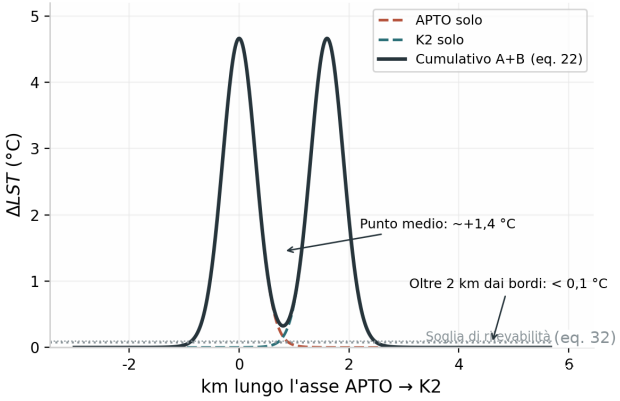



Figura C4 — Scenario cumulativo APTO + K2 lungo l'asse dei due campus (eq. 22): anche raddoppiando il calore, oltre 2 km l'incremento resta sotto 0,1 °C.

Anche raddoppiando il calore dissipato, oltre 2 km l'incremento resta sotto 0,1 °C: non si forma un'isola di calore regionale. L'aggiornamento 2026 aggiunge il terzo termine: la procedura VIA dell'Amazon Edificio A di Zibido [46] porta il quadrante a tre sorgenti nel raggio di pochi chilometri, e la commissione richiede la modellazione cumulativa esplicita di Amazon, APTO e Rozzano negli stessi scenari meteorologici — l'equazione (22) estesa a tre termini è oggi una richiesta procedurale, non solo teorica. Va registrato che l'applicazione letterale del metodo Cambridge alla stessa configurazione dà +4,0 °C (S2) nella fascia di overlap: il divario tra i due risultati è esattamente la misura dell'incertezza metodologica che la Fase 6 è chiamata a risolvere.

Cosa cambia davvero (e non è la temperatura): (1) **consumo di suolo**: da ~23 a ~48+ ha di seminativo sigillato (più sottostazioni, elettrodotti 380 kV, viabilità): impatto dominante e irreversibile; (2) **frammentazione ecologica**: il quadrante Lacchiarella–Zibido San Giacomo–Siziano–Noviglio rischia una cintura continua di campus; i corridoi ecologici primari e il reticolo dei fontanili (254 attivi nel Parco [29]) diventano l'elemento critico; (3) **effetto di bordo termico**: +1–3 °C di LST entro ~500 m dai footprint, rilevante per i microhabitat agrari (siepi, fossi, fontanili), la scala che le misure di Phoenix hanno confermato essere quella del segnale dell'attività [35]; (4) **pressioni cumulative non termiche**: prelievi idrici su falda a 1–1,5 m (eq. 33), illuminazione notturna, rumore, test dei diesel; (5) **preferenza di scenario**: per l'habitat il polo contiguo (infrastrutture condivise, un solo effetto di bordo) frammenta meno di due siti dispersi.

## C.10 Integrazione dei tre approcci e ruolo decisionale

Sul tavolo ci sono tre approcci: lo studio Cambridge (osservazione globale), la sua applicazione diretta al sito (§C.3) e il modello cumulativo (§C.4–C.5). Il confronto epistemologico è in tabella C12, quello quantitativo in tabella C13.

Tabella C12 — Basi epistemologiche dei tre approcci

| Aspetto | Cambridge [1] | Applicazione diretta (§C.3) | Modello cumulativo (cap. 5–6) |
|---|---|---|---|
| Natura | Event-study osservativo globale | Trasferimento territoriale della curva Cambridge | Modello meccanicistico cumulativo (impianto + attività) |

| Aspetto | Cambridge [1] | Applicazione diretta (§C.3) | Modello cumulativo (cap. 5–6) |
|---|---|---|---|
| Dati | LST MODIS 2004–2024, 8.400+ impianti, WorldPop | Coefficienti di Cambridge; atti VIA, ISTAT, dati Parco | Dati VIA del progetto, letteratura LST Pianura Padana, fisica della dispersione (eq. 20 e 25–30) |
| Cosa misura / prevede | Un segnale aggregato (edificio + esercizio + contesto) | La proiezione locale di quel segnale aggregato | Le due sorgenti separate e la loro somma cumulativa |
| Falsificabilità | Assente | Assente | Esplicita (soglie e placebo test, Fase 6) |
| Limite principale | Nessuna scomposizione causale, nessun controllo, no peer review | Eredita integralmente i limiti di Cambridge; sovrapposizione lineare non validata | Ex-ante: parametri da letteratura, PUE non pubblico; attende verifica sperimentale |
| Uso corretto | Dimostrare che il fenomeno esiste e merita misura | Dimensionare la questione locale in regime precauzionale | Prevedere, progettare il monitoraggio, verificare |

Tabella C13 — Confronto quantitativo sulla configurazione reale (APTO + K2, ~924 MWth, siti a 1,6 km)

| Metrica | Applicazione Cambridge S2 | Modello cumulativo | Ancoraggio Uruguay (17% [13]) |
|---|---|---|---|
| Picco nell'area tra i campus | +4,0 °C (S3: +4,6 °C) | +1,4 °C nel punto medio | ~+0,7 °C operativi + isola edilizia locale |
| ΔT a 1 km dal sito | +1,9 °C | +0,4 °C | ~+0,3 °C |
| ΔT a 5 km | +1,6 °C | < 0,02 °C | ~+0,3 °C |
| ΔT a 10 km | ~+1,2 °C | ~0 | sotto soglia |
| Popolazione «esposta» (>0,5 °C) | ~132.000 residenti (13 comuni) | pochi nuclei entro 1–2 km | comuni entro ~3 km |
| Suolo agricolo > 3 °C | ~9.300 ha | ~40–60 ha (solo footprint) | centinaia di ha |

Come discriminarli. I tre approcci fanno previsioni diverse e misurabili: il caso Lacchiarella–Zibido San Giacomo è un esperimento naturale decisivo, a condizione di attivare la Fase 1 prima dei cantieri. Se dopo l'avvio, e dopo aver sottratto la componente A misurata sui controlli costruiti, la LST a 2 km supera +0,5 °C → il modello cumulativo va rivisto verso l'alto e la curva Cambridge guadagna credito; se il segnale resta sotto +0,1 °C oltre 2 km → la scomposizione è confermata e la curva Cambridge va riclassificata come effetto-edificio; se il gradino sul footprint supera +6 °C in media annua → il problema è il progetto edilizio (albedo, verde, coperture) più che l'esercizio.

Tabella C14 — Ruolo decisionale dei tre approcci

| Fase / uso | Approccio di riferimento | Motivo |
|---|---|---|
| Dibattito autorizzativo (VIA, prescrizioni) | Applicazione Cambridge (scenario massimale) | Principio di precauzione: giustifica baseline, valutazione cumulativa, clausole di revisione |
| Previsione tecnica e progettazione del monitoraggio | Modello cumulativo | Unico che separa le sorgenti e produce previsioni falsificabili |
| Verifica ex-post (Fase 6) | Modello cumulativo + ancoraggio Uruguay | DiD con controlli; l'83/17 di Uruguay [13] come prior empirico ad alta risoluzione |
| Comunicazione pubblica | Forchetta a tre approcci | Evitare sia il «+5 gradi» come previsione sia il «nessun impatto» di Magenta |

## C.11 Nota di aggiornamento: lo stato procedurale a novembre 2026

Questa sezione raccoglie lo stato procedurale aggiornato a novembre 2026. **APTO (Lacchiarella).** L'istruttoria CTVIA è entrata nella fase conclusiva: il Ministero della Cultura ha emesso il parere tecnico del 4 marzo 2026 e i termini per le osservazioni pubbliche sono scaduti il 1° ottobre 2026; la finestra per chiedere la rete di monitoraggio di Fase 1 *prima* del cantiere è quindi quella delle prescrizioni conclusive — la raccomandazione operativa di §C.8 non è più generica ma calendarizzata. **K2 Strategic.** Il progetto, nato sul comparto di Badile (Zibido San Giacomo), si è esteso nel 2026 a quote del territorio di Lacchiarella: i due campus non sono più separati da un confine comunale ma condividono il medesimo ambito — la valutazione cumulativa (eq. 22) è ancora più stringente. **Il terzo polo.** La procedura VIA dell'Amazon Edificio A di Zibido (ID 14476) mostra, negli atti 2026, la direzione richiesta dalla commissione: limiti autorizzativi ai prelievi idrici con bilancio mensile e WUE pubblico, programmi vincolanti e coordinati per i test dei generatori (con divieto di sovrapposizione tra impianti), modellazione cumulativa multisorgente di aria, acqua, rumore, suolo, calore e traffico [46]. **Il quadro pubblico.** A ottobre 2026 la Rete nazionale Stop Data Center ha tenuto la prima manifestazione nazionale (piazza della Scala, 10 ottobre, ~40 comitati) chiedendo moratoria e piano nazionale [45], e la Regione ha annunciato la revisione restrittiva della L.R. 11/2026 su aree dismesse e sostenibilità. **Le soluzioni.** I tre precedenti di recupero del calore (§5.4, §13.4) rendono la prescrizione di teleriscaldamento per Lacchiarella–Zibido–Binasco tecnicamente e industrialmente praticabile. La figura C5 riassume la cronologia.

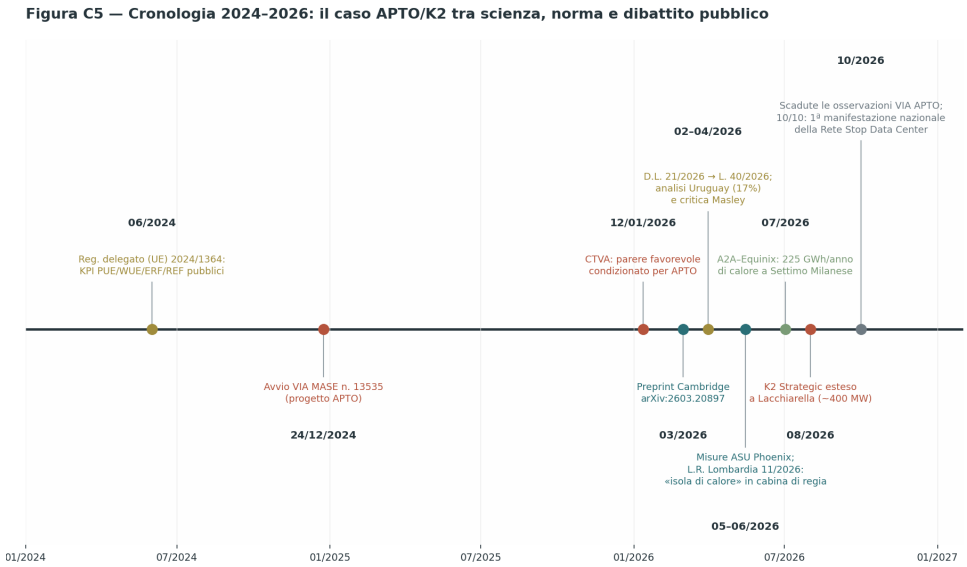



Figura C5 — Cronologia 2024–2026 del quadrante: procedure, norme e mobilitazione. La finestra per la baseline pre-cantiere (Fase 1) è quella delle prescrizioni conclusive.

> *Conclusione dell'appendice. L'analisi dello studio di Cambridge dimostra che il fenomeno esiste e merita misura; la sua applicazione diretta al sito ne espone le lacune e fornisce lo scenario massimale precauzionale; il modello cumulativo — somma del calore dell'impianto e del calore dell'attività, con controlli e criteri di falsificazione — è lo strumento di previsione e verifica. Le raccomandazioni operative convergono e ora hanno un calendario: baseline pre-cantiere, VIA cumulativa per il «triangolo dei data center», vincolo di recupero del calore, compensazione idrica e di suolo, monitoraggio partecipato, clausola di revisione. Il 2026 ha aggiunto che queste richieste non sono più solo scientificamente fondate: sono la direzione in cui la norma e le istruttorie si stanno già muovendo.*

## Bibliografia


- [1] Marinoni, A., et al. (2026). The data heat island effect: quantifying the impact of AI data centers on land surface temperature. Preprint arXiv:2603.20897 (non sottoposto a revisione paritaria al novembre 2026).
- [2] Masley, A. (2026, 31 marzo). Data centers' heat exhaust is not raising the land temperature. Contro-analisi fisica indipendente.
- [3] Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108, 1–24.
- [4] Oke, T. R. (1987). Boundary Layer Climates (2ª ed.). Methuen, London.
- [5] Stewart, I. D., Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 93, 1879–1900.
- [6] Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. International Journal of Climatology, 31, 189–199.
- [7] Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC). Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133, 380–394.
- [8] Bastiaanssen, W. G. M., et al. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Journal of Hydrology, 212–213, 198–212.
- [9] Järvi, L., et al. (2011). The Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS).
- [10] Briggs, G. A. (1975). Plume rise predictions. In Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses. American Meteorological Society.
- [11] Stull, R. B. (1988). An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic.
- [12] IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
- [13] Amenaza Roboto / Pulitzer Center (2026, 22 aprile). Data Centers: The Heat Behind the Cloud. Contro-analisi Landsat sul caso Uruguay (32.861 osservazioni, 25 anni).
- [14] New Scientist (2026, 30 marzo). AI data centres can warm surrounding areas by up to 9.1 °C.
- [15] MASE — Portale Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali VAS-VIA-AIA. Realizzazione di un data center in Lacchiarella (campus APTO): documentazione di procedura.
- [16] Vitali, L. (2017). Elementi di fisica dell'atmosfera (materiale didattico). Alma Mater Studiorum — Università di Bologna.
- [17] Davolio, S. Dispense di fisica dell'atmosfera (materiale didattico universitario).
- [18] Wallace, J. M., Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric Science: An Introductory Survey (2ª ed.). Academic Press.
- [19] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

- [20] Hanna, S. R., Briggs, G. A., Hosker, R. P. (1982). Handbook on Atmospheric Diffusion. DOE/TIC-11223.
- [21] Pasquill, F. (1961). The estimation of the dispersion of windborne material. The Meteorological Magazine, 90, 33–49.
- [22] Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. Symposia of the Society for Experimental Biology, 19, 205–234.
- [23] L'atmosfera — materiale didattico divulgativo sulla struttura e i processi dell'atmosfera.
- [24] The Green Grid (2014). PUE: A Comprehensive Examination of the Metric. White Paper n. 49.
- [25] Kopp, G., Lean, J. L. (2011). A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance. Geophysical Research Letters, 38, L01706.
- [26] Pileri, P. (2026). La febbre dei data center danneggia il suolo. Altreconomia.
- [27] Regione Lombardia (2026). DGR XII/5612 del 12/01/2026 — parere VIA comparto H2a, Lacchiarella.
- [28] La Provincia Pavese (2026, 11 agosto). Data center a Zibido e Lacchiarella, il Consiglio dei comuni.
- [29] Città Metropolitana di Milano. Parco Agricolo Sud Milano — Il territorio in cifre.
- [30] Metz, M., Rocchini, D., Neteler, M. (2014). Surface temperatures at the continental scale: tracking changes with remote sensing at unprecedented detail. Remote Sensing, 6, 3822–3840.
- [31] Wikipedia/Wikidata; Italia in Dettaglio, portale statistico. Badile (frazione di Zibido San Giacomo): 45°21′02″N, 9°07′37″E; popolazione ≈1.191 abitanti. Centro commerciale Il Girasole, Lacchiarella: 45,3336°N, 9,1225°E.
- [32] Uptime Institute (2026). Global Data Center Survey 2026 — Keynote Report (PUE medio di settore 1,52; 23% degli operatori sotto 1,3).
- [33] Uptime Intelligence (2026, agosto). The growing PUE advantage of larger data centers (PUE medio pesato sulla capacità: 1,36). Update 518.
- [34] Uptime Institute Journal (2026, 20 agosto). Data centers face new scrutiny over heat island effect.
- [35] Sailor, D. J., Samareh Abolhassani, S., Martin, E. (2026). Data Center Waste Heat as an Emerging Urban Thermal Hazard: First Field Measurements of Neighborhood-Scale Air Temperature Impacts. Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities, 7(2), 024501.
- [36] NASA/JPL. ECOSTRESS — ECO_L2G_LSTE v002: Land Surface Temperature & Emissivity, ~70 m, ISS.
- [37] Parlamento Europeo e Consiglio (2023). Direttiva (UE) 2023/1791 sull'efficienza energetica (EED), art. 12 e allegato VI.
- [38] Commissione Europea (2024). Regolamento delegato (UE) 2024/1364: indicatori e formati di reporting per i data center (PUE, WUE, ERF, REF).

- [39] Governo Italiano (2026). Decreto-legge 20 febbraio 2026, n. 21, art. 8: procedimento unico per i centri di elaborazione dati.
- [40] Governo Italiano (2023). D.L. 104/2023, conv. L. 136/2023, art. 13 («Asset»): procedura per gli investimenti di preminente interesse strategico nazionale.
- [41] Regione Lombardia (2026). Legge regionale 3 giugno 2026, n. 11: cabina di regia per i centri dati, analisi degli impatti cumulativi e monitoraggio dell'effetto «isola di calore».
- [42] A2A – Equinix (2026, 2 luglio). Decarbonizzazione attraverso il recupero di calore dai data center: partnership strategica a Milano (campus di Settimo Milanese; ~225 GWh/anno a regime).
- [43] A2A Calore e Servizi – DBA – Retelit (2024, 6 agosto). A Milano il primo progetto in Italia di recupero del calore da un data center (Avalon 3, Municipio 6; 15 GWh/anno, 1.250 famiglie).
- [44] A2A – Qarnot (2025, 25 giugno). Brescia: primo data center a raffreddamento liquido connesso al teleriscaldamento (calore a 65 °C; 16 GWh/anno a regime).
- [45] Il Post (2026, 18 ottobre). Le proteste contro i data center sono arrivate anche in Italia (Rete Stop Data Center; manifestazione di piazza della Scala, 10 ottobre 2026).
- [46] MASE (2026). Procedura VIA ID 14476 — Amazon Data Center Edificio A, Zibido San Giacomo: osservazioni e richieste della CTVA (bilancio idrico, effetti cumulativi, coordinamento dei test dei generatori, modellazione multisorgente).



### CLAUSOLA DI UTILIZZO E CITAZIONE

*Il presente lavoro può essere liberamente utilizzato, riprodotto e distribuito, anche parzialmente, per finalità di studio, ricerca, divulgazione e dibattito pubblico, a condizione che venga sempre citato l'autore nella forma: «Lepori, V. (2026). Teoria del modello cumulativo del calore per i data center — derivazione dal metodo Cambridge e protocollo applicativo per la valutazione d'impatto termico. Prima edizione, novembre 2026». Ogni utilizzo privo di attribuzione al sottoscritto è da considerarsi non autorizzato.*


Vincenzo Lepori, novembre 2026 — saggio a scopo divulgativo e di supporto al dibattito pubblico. Il modello è applicabile a qualunque campus di data center; i parametri di letteratura vanno sostituiti con la baseline di sito.